



Università degli Studi
di Cagliari



Dipartimento
di Geotecnica
e Tecnologie
Ambientali

Dottorato di Ricerca in Geotecnica XIX ciclo

Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/28 e ICAR/07

L'effetto fisico del getto d'acqua ad alta velocità sulle terre

Paolo Tronci

Anno Accademico
2006/2007

Sommario

Indice delle Figure	4
Indice delle Tabelle	7
1. Introduzione.....	9
2. Il getto d'acqua ad alta velocità.....	11
2.1. Evoluzione storica del getto d'acqua	11
2.2. Usi industriali del <i>waterjet</i>	12
2.2.1 Ingegneria mineraria.....	13
2.2.2 Pulitura industriale e disincrostazione.....	13
2.2.3 Ingegneria civile	14
2.2.4 Usi militari.....	14
2.2.5 Usi nel campo della medicina.....	14
2.3 Tipi di getto d'acqua	15
2.3.1 Getti stazionari.....	15
2.3.2 Getti pulsanti o modulati	17
2.3.3 Getti interrotti	18
2.3.4 Getti cavitanti	18
2.3.5 Getti abrasivi	19
2.4 Il sistema <i>waterjet</i>	20
2.4.1 Le pompe	21
2.4.2 La lancia <i>waterjet</i>	22
2.4.3 Gli ugelli	22
2.5 L'efficacia del getto d'acqua.....	24
2.5.1 Introduzione.....	24
2.5.2 Pressione del getto	24
2.5.3 Portata, potenza idraulica, energia specifica del getto.....	24
2.5.4 Distanza d'impatto	25
2.5.5 Diametro dell'ugello	25
2.5.6 Velocità di traslazione del getto	25
2.5.7 Direzione d'impatto	25
3 L'applicazione dei sistemi a getti d'acqua ad alta velocità ai terreni.....	27
3.1 Introduzione	27
3.2 Effetti della pressione e della portata per taglio dei terreni nei getti ad alta energia (Yoshida, et al. 1989)	28
3.2.1 Equipaggiamento, parametri di esercizio, modalità di esecuzione delle prove..	28

3.2.2	Risultati, valutazioni tecniche ed economiche, conclusioni	29
3.2.3	Influenza delle caratteristiche del terreno nell'utilizzo della tecnologia a getti d'acqua (Atmatzidis e Ferrin 1987)	30
4	Lo studio della velocità di penetrazione e delle deformazioni indotte su un terreno dal getto d'acqua fermo o in movimento traslatorio	41
4.1	Introduzione.....	41
4.2	L'apparato sperimentale	41
4.2.1	Il portacampione	42
4.2.2	Il sistema di compattazione.....	43
4.2.3	Il sistema di generazione dell'alta pressione.....	44
4.2.4	La lancia <i>waterjet</i> e l'ugello.....	45
4.2.5	Sistema di otturazione del getto	45
4.2.6	Sistema di acquisizione delle immagini.....	46
4.2.7	Il sistema di sincronizzazione (<i>trigger</i>)	47
4.2.8	Il software di comando della telecamera MEMVIEW.....	47
4.2.9	Il sistema di illuminazione	49
4.2.10	Il sistema di movimento.....	49
4.3	Il materiale.....	49
4.4	La procedura di prova.....	50
4.5	La tecnica Particle Image Velocimetry – PIV	51
4.5.1	Principi del PIV	52
4.5.2	Particolarità, vantaggi e svantaggi delle misure PIV	53
4.5.3	Una tecnica concorrente X-RAY-FILM	55
4.6	Il software <i>geoPIV</i>	55
4.6.1	Possibili problemi di analisi.....	59
4.6.1.6	Tessitura insufficiente: <i>wild vector</i>	60
4.7	La misura della velocità di penetrazione e delle deformazioni indotte dal getto d'acqua sul terreno	60
4.8	Il piano sperimentale	64
4.9	I risultati	66
4.9.1	Risultati qualitativi.....	66
4.9.2	Risultati dell'analisi PIV	67
4.10	La velocità di penetrazione nel caso di getto in movimento traslatorio	69
4.11	Conclusioni e limitazioni	71
5	Lo studio dell'effetto della rototraslazione	73
5.1	Introduzione.....	73
5.2	L'apparato sperimentale	73
5.2.1	Il sistema di preparazione del campione	74

5.2.2	Il portale di sostegno	77
5.2.3	Il sistema porta-lancia.....	78
5.2.4	La lancia <i>waterjet</i>	80
5.2.5	Il sistema di otturazione del getto.....	82
5.3	La sequenza operativa.....	83
5.4	Il materiale	83
5.5	Studio della forma del getto in aria.....	84
5.6	Il modello geometrico del movimento dell'ugello	85
5.7	Le prove e i risultati	86
5.7.1	Il raggio di influenza.....	87
5.7.2	Energia specifica e volume trattato nell'unità di tempo.....	88
5.7.3	Contenuto d'acqua	89
5.7.4	Analisi granulometrica post-trattamento.....	89
5.8	Conclusioni, limitazioni e sviluppi futuri	90
6	La sperimentazione in situ	92
6.1	Obiettivo della campagna di indagini	92
6.2	Il sistema a getto d'acqua.....	92
6.3	La testa porta ugelli.....	93
6.4	Il sistema di movimentazione	93
6.5	Il sito	94
6.6	Le prove	96
6.7	Risultati – I diametri della colonna trattata e le variazioni granulometrie.....	98
6.8	Conclusioni	101
7	Una possibile applicazione del getto d'acqua ad alta velocità alla bonifica dei siti contaminati	103
7.1	Introduzione	103
7.2	Barriere Permeabili Reattive (PRB)	104
7.3	La tecnica di realizzazione delle PRB	105
7.4	L'approccio modellistico nell'applicazione delle PRB.....	107
7.5	Modello della modifica della permeabilità	108
7.6	Risultati della simulazione.....	109
7.7	Conclusioni	111
8	Conclusioni.....	113
	Bibliografia.....	115
	APPENDICE 1	
	APPENDICE 2	
	APPENDICE 3	121

Indice delle Figure

Figura 2.1 - Monitor usato per l'idroescavazione in California durante il secolo scorso	11
Figura 2.2 - Usi industriali del <i>waterjet</i> in funzione di pressione e portata	12
Figura 2.3 - Classificazione dei getti d'acqua	15
Figura 2.4 - Relazione tra velocità e pressione nei liquidi ideali e reali (in teoria e in pratica)	16
Figura 2.5 - Confronto tra le pressioni di colpo d'ariete e ristagno in funzione della velocità (Summers e Mazurkiewicz 1991)	18
Figura 2.6 - Schema di un sistema <i>waterjet</i>	21
Figura 2.7 - Progetto ottimale degli ugelli di Rouse e Nickonov & Shavlovskii	22
Figura 2.8 - Confronto fra le prestazioni dei due ugelli (Leach e Walker)	23
Figura 3.1 - Schema del sistema sperimentale	29
Figura 3.2 - La relazione tra distanza percorsa dal getto e tempo	29
Figura 3.3 - Distanza raggiunta a $t=0.1s$ con le differenti combinazioni di pressione e portata, a parità di energia spesa ($E=(P \times Q)/T$)	30
Figura 3.4 - Curve granulometriche dei quattro tipi di campione	31
Figura 3.5 - La profondità di penetrazione in funzione del tempo	33
Figura 3.6 - La profondità di penetrazione in funzione della velocità di traslazione per i quattro campioni sotto esame	34
Figura 3.7 - La profondità di penetrazione in funzione della velocità di traslazione per i campione 1 con diversi gradi di saturazione	35
Figura 3.8 - La profondità di penetrazione in funzione della massa volumica secca	36
Figura 3.9 - La profondità di penetrazione in funzione della grado di saturazione	37
Figura 3.10 - Profondità di penetrazione in funzione della del quadrato dell'indice dei vuoti	39
Figura 4.1 - L'apparato sperimentale	41
Figura 4.2 - Schema dell'apparato sperimentale utilizzato.	42
Figura 4.3 - Il portacampione	43
Figura 4.4 - Il portacampione	43
Figura 4.5 - Alcune immagini della fase di compattazione del terreno. (a) compattazione strato numero 1; (b) compattazione strato numero 6; (c) compattazione strato numero 12	44
Figura 4.6 - Pompa per alta pressione Hammelmann	44
Figura 4.7 - La lancia <i>waterjet</i>	45
Figura 4.8 - Il sistema di otturazione del getto a sinistra chiuso e a destra aperto	46
Figura 4.9 - La telecamera ad alta velocità	46
Figura 4.10 - Schermata principale del software MEMVIEW	48
Figura 4.11 - Schermata impostazione trigger MEMVIEW	48
Figura 4.13 - Curva granulometrica della sabbia per i campioni	49
Figura 4.12 - Il sistema di movimento	49
Figura 4.14 - Immagine acquisita durante una prova su un campione secco	50
Figura 4.15 - Sistema sperimentale configurato per l'esecuzione della prova	50
Figura 4.16 - Analisi PIV del flusso fluido dentro un cilindro	51
Figura 4.17 - Esempi di applicazioni PIV - a sinistra: la velocità dei gas emessi in un eruzione vulcanica, a destra: le velocità di autoveicoli	52
Figura 4.18 - Schema di un apparato per l'analisi PIV	52
Figura 4.20 - Apparato per lo studio di un flusso tridimensionali con la tecnica <i>stereoPIV</i>	54
Figura 4.19 - Ripresa di un flusso gassoso	54
Figura 4.21 - Esempio di Mesh 20x20 pixel	56
Figura 4.22 - Schema dell'analisi PIV	57

Figura 4.23 - Esempio di rappresentazione vettoriale dei risultati dell'analisi <i>geoPIV8</i>	58
Figura 4.24 - Esempio di rappresentazione della posizione delle <i>patch</i> al tempo <i>t</i>	58
Figura 4.25 - Sezione per la misura (o traguardo) della velocità di penetrazione	60
Figura 4.26 - Grafico variazioni dello spostamento (dx) rispetto al tempo.....	61
Figura 4.27 - Figura 3.25 - Grafico variazioni dello spostamento (dy) rispetto al tempo.....	61
Figura 4.28 - Sezione per la misura (o traguardo) della velocità di penetrazione.....	62
Figura 4.29 - Sezioni per la misura della velocità di penetrazione.....	63
Figura 4.30 - La velocità di penetrazione lungo l'asse del campione	63
Figura 4.31 - Esempio di grafico degli spostamenti lungo l'asse x cumulati	63
Figura 4.32 - Esempio di grafico degli spostamenti lungo l'asse y cumulati	64
Figura 4.33 - Profili degli spostamenti delle patch su una sezione, calcolata per 5 tempi successivi.....	64
Figura 4.34 - Relazione tra pressione e potenza idraulica per diametri dell'ugello di 0.8-1-1.2-1.4 mm.....	65
Figura 4.35 - Immagini del cono d'influenza del getto - W=35 kW (sinistra) e W=115 kW (destra).....	67
Figura 4.36 - La velocità di penetrazione per tutte le prove.....	68
Figura 4.37 - La velocità di penetrazione per W = 35 kW	68
Figura 4.38 - La velocità di penetrazione per W = 80 kW	69
Figura 4.39 - La velocità di penetrazione per W = 112 kW	69
Figura 4.40 - La velocità di penetrazione per velocità di traslazione di 0, 0.5, 0.75, 1.....	70
Figura 5.1 - Il contenitore portacampione	74
Figura 5.2 - Omogeneizzazione del materiale	75
Figura 5.3 - Schema del sistema di consolidazione del campione.....	75
Figura 5.4 - Sistema di compattazione: 1)Pistone idraulico 2) Portale di sostegno; 3) Pistone; 4) Piastra di carico; 5) Piastra di fondo; 5) Transpallet.....	76
Figura 5.5 - Compattazione in corso - in evidenza il comparatore.....	76
Figura 5.6 - Portacampione in evidenza la piastra superiore di tenuta.....	77
Figura 5.7 - Le operazioni di carotaggio:1) Pistone; 2) Carotiere; 3) Piastra di tenuta.....	77
Figura 5.8 - Disegno costruttivo d'insieme e portale di sostegno	78
Figura 5.9 - Il portale di sostegno	78
Figura 5.10 - Il sistema porta - lancia: vista anteriore e vista posteriore 1) cuscinetti; 2) mensola triangolare.....	79
Figura 5.11 - Particolari del sistema di movimento.....	79
Figura 5.12 - Il quadro elettronico di controllo	80
Figura 5.13 - La testa portaugelli.....	81
Figura 5.14 - Particolari della lancia 1) connessione tra il tubo flessibile e la lancia; 2) giunto rotante (swivel).....	82
Figura 5.15 - Il sistema di chiusura del getto: aperto (a sinistra); chiuso (a destra) 1) pistone; 2) aste di collegamento; 3) cilindro di chiusura; 4) testa portaugelli	83
Figura 5.16 - Curva granulometrica della sabbia per i campioni	84
Figura 5.17 - Lo studio del getto in aria	84
Figura 5.18 - Geometria del getto d'acqua.....	85
Figura 5.19 - L'esecuzione della prova.....	86
Figura 5.20 - Campioni trattati	87
Figura 5.21- Raggio d'influenza in funzione della velocità assoluta di percorrenza dell'elica	88
Figura 5.22 - Energia specifica (sinistra) e volume trattato (destra) in funzione della velocità totale.	88
Figura 5.23 - Umidità in funzione del raggio di influenza	89
Figura 5.24 - Granulometria pre e post trattamento dei campioni 2 e 3	90
Figura 5.25 - Schema di aspirazione (sinistra) e di pompaggio (destra)	90

Figura 6.1 - Il sistema di iniezione: il carro con la lancia, la pompa e il quadro di controllo .	92
Figura 6.2 - Particolare della testa portaugelli e del getto in aria	93
Figura 6.3 – Il sistema di movimento	94
Figura 6.4 - Stratigrafia del sondaggio SA	95
Figura 6.5 - Stratigrafia del sondaggio SB.....	95
Figura 6.6 - Planimetria e immagine delle posizioni di prova.....	96
Figura 6.7 - Schema del posizionamento dei punti di misura.....	97
Figura 6.8 - Il foro di prova e dei 2 SPT di misura	98
Figura 6.9- La colonna trattata nelle prove superficiali 9 e 10	99
Figura 6.10 - Curve granulometriche dei campioni di fango - prove 1-8.....	100
Figura 6.11 - Curve granulometriche relative alle prove superficiali 9 e 10.....	100
Figura 7.1 - Barriera permeabile reattiva continua	104
Figura 7.2 - Barriera permeabile reattiva funnel and gate	104
Figura 7.3 - Barriera permeabile reattiva reactive vessels	105
Figura 7.4 - Macchina speciale per la costruzione delle PRB	105
Figura 7.5 - Realizzazione di PRB per idrofratturazione verticale	106
Figura 7.6 - Realizzazione di PRB per idrofratturazione vertical	106
Figura 7.7 - Schema di funzionamento della lancia <i>waterjet</i> in una sezione verticale di terreno.	107
Figura 7.8 – Condizioni iniziali dell’ossigeno per la barriera continua (sinistra), per il caso dei pozzi (centro) e per il caso <i>waterjet</i> (destra).	108
Figura 7.9 – Ipotesi di modifica della permeabilità	109
Figura 7.10 – Plume del contaminante dopo 80 giorni di simulazione. A sinistra per il caso della barriera continua, al centro per il caso dei pozzi e a destra per il caso <i>waterjet</i>	110
Figura 7.11 – Masse di contaminante ed ossigeno consumati nel dominio in funzione del tempo (sinistra) e masse cumulate di contaminante ed ossigeno in funzione del tempo (destra).	111

Indice delle Tabelle

Tabella 2.1- Prestazioni di taglio con getto a sola acqua (Summers e Mazurkiewicz 1991) ...	15
Tabella 2.2 - Vantaggi della tecnologia di taglio con getto d'acqua ad alta pressione	18
Tabella 2.3- Prestazioni di taglio con getto abrasivo (Summers e Mazurkiewicz 1991)	19
Tabella 2.4 - Vantaggi della tecnologia di taglio con getto d'acqua abrasivo.....	20
Tabella 3.1 - Granulometria del campione	28
Tabella 3.2 - Principali caratteristiche geotecniche.....	28
Tabella 4.1- Risoluzione, tempo di esposizione e frequenza di acquisizione	47
Tabella 4.2 - File di testo della matrice della <i>mesh</i>	56
Tabella 4.3 - Risultato numerico dell'analisi <i>geoPIV8</i>	57
Tabella 4.4 - Sequenza degli esperimenti.....	65
Tabella 4.5 -Parametri di posizionamento del getto	66
Tabella 4.6 - Parametri di acquisizione	66
Tabella 4.7 - Parametri di prova - movimento traslatorio	70
Tabella 5.1- Caratteristiche tecniche della betoniera.....	74
Tabella 5.2 - Parametri operativi utilizzati	86
Tabella 5.3 - Parametri operativi della sperimentazione	87
Tabella 6.1- Piano sperimentale	97
Tabella 6.2 - I diametri della colonna trattata.....	98
Tabella 6.3- Posizione misure e campionamenti - sono indicati in rosso i campioni su cui è stata eseguita la misura della granulometria	99
Tabella 7.1 - – Sommario dei costi per una barriera di tipo PRB profonda 20 m e lunga 18. (US-EPA, 2002)	109
Tabella 7.2 – Bilancio di massa per le 3 tipologie costruttive dopo 80 giorni.	110

1. Introduzione

La tecnologia dei getti d'acqua ad alta velocità consente di concentrare una grande energia su una superficie estremamente ridotta. Essa è largamente utilizzata per il taglio delle pietre ornamentali, dei metalli e di molti altri materiali, ed è utilizzato come supporto dello scavo e per il consolidamento colonnare nelle terre. Attualmente la ricerca si rivolge allo studio di nuove possibilità di applicazione fra le quali la bonifica dei terreni contaminati, in cui il getto d'acqua può migliorare le condizioni idrauliche del terreno e può essere il vettore di sostanze decontaminanti.

In questo scritto viene riportato uno studio degli effetti del getto d'acqua ad alta velocità sui terreni granulari, sulle sue capacità di penetrazione in diverse condizioni operative.

Il lavoro, riportato, partendo dall'analisi critica delle esperienze oggi disponibili si articola in tre fasi: nella prima fase del programma sperimentale viene analizzata l'azione sul terreno operata da un getto fisso: dall'esame degli spostamenti misurati delle particelle di terreno coinvolte dal getto, viene ricavata la velocità di penetrazione e la sua variazione in funzione del tempo durante l'avanzamento del fronte del getto all'interno del materiale.

Allo scopo è stata utilizzata una tecnica di misura derivante dalle esperienze nel campo della fluidodinamica, detta PIV (Particle Image Velocimetry), che oggi trova le sue prime applicazioni nel campo della meccanica delle terre e della geotecnica.

L'obiettivo primario in tutti i casi è stato quello di determinare l'influenza dei due parametri fondamentali che definiscono l'idrodinamica del getto (portata e pressione) nei riguardi degli effetti prodotti.

Nella seconda fase viene studiato l'effetto del movimento traslatorio e rototraslatorio del getto sullo spostamento delle particelle di terreno e quindi sulla distanza di penetrazione nel tempo fino al valore massimo raggiungibile per un dato terreno, in funzione dei parametri di movimentazione della lancia. Le sperimentazioni sono state condotte in primo luogo in laboratorio in condizioni simili a quelle dell'applicazione industriale, utilizzando un'attrezzatura sperimentale, appositamente costruita, e lavorando su campioni di terreno opportunamente ricostruiti. Successivamente è stata eseguita una campagna di prove *in situ* al fine di verificare la rispondenza dei risultati di laboratorio alla scala reale. Per tale scopo è stata utilizzata un'attrezzatura dotata di lancia a movimento rototraslatorio, normalmente impiegata per operazioni di “*jet grouting*”, modificata per generare getti a sola acqua.

Nella terza fase è stata esplorata attraverso la modellazione numerica la possibilità di applicazione della tecnica alla bonifica dei terreni contaminati.

L'obiettivo proposto necessita lo studio di un grande numero di casi di condizioni operative e di tipologie di terreno, e non può certo essere qui esaurito.

2. Il getto d'acqua ad alta velocità

2.1. Evoluzione storica del getto d'acqua

L'acqua erode la roccia e il suolo in modo naturale, ma ad una velocità che certamente non è di interesse per la tecnica. Tuttavia la capacità dell'acqua di penetrare all'interno delle fratture e tra gli spazi intergranulari della roccia, porta molti vantaggi soprattutto nella coltivazione di depositi friabili.

Infatti, già in tempi antichi, Plinio descrive nel libro "La scienza naturale" la costruzione di canali (*corrugi*), che portavano l'acqua in bacini artificiali presso le zone ricche di minerale aurifero. Quando i bacini (lunghi circa 70 metri e profondi oltre 3), erano pieni, veniva aperta una piccola uscita, e il torrente che ne veniva fuori dilavava le pareti della montagna e trascinava in pianura l'oro che veniva poi recuperato. In questo modo i Romani procedevano nella coltivazione dei giacimenti auriferi in Spagna. Agricola (XVI secolo) fa notare che con il tempo tale tecnica venne portata in Germania da minatori italiani.

Con la rivoluzione industriale, grazie all'introduzione della pompa idraulica manuale, i minatori gallesi e polacchi poterono modificare quest'arte.

Tale pratica arrivò nel Nuovo Continente a seguito della corsa all'oro del 1849. Nel 1852 in California si ebbe lo sviluppo della tecnica del "booming": Chalbot e Matteson costruirono un sistema pompa-tubo-ugello per dilavare la roccia tenera contenente l'oro dai lati della collina (Figura 2.1) (Summers e Mazurkiewicz 1991). Il tubo era lungo circa 12 metri adattato con un ugello di ottone.

Le applicazioni tuttavia erano limitate da restrizioni sulla disponibilità dei depositi in superficie.

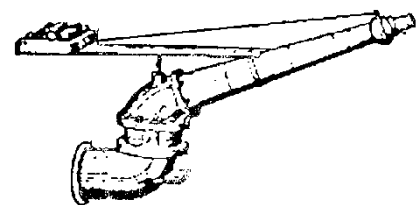


Figura 2.1 -Monitor usato per l'idroescavazione in California durante il secolo scorso

Con il progredire della tecnologia l'idroescavazione conquistò l'Europa: nel 1918 un terzo della torba russa era coltivata con tale tecnica. Dal 1935 al 1939 l'Istituto Tecnologico di Leningrado sviluppò il concetto del cannone d'acqua con ugelli rotanti e pulsanti allo scopo di abbattere il carbone dalla fronte e aumentare significativamente la produttività in coltivazione. Interrotta dalla guerra, la ricerca riprendeva nel 1946 e sei anni dopo, venne realizzata in Polonia una produzione di 600 tonnellate/turno con getto d'acqua pulsante-rotante.

Nel 1949 la American Gilsonite Co. tentò di ripetere le esperienze russe ma inizialmente

senza successo. Solo a partire dal 1954, la ditta poté sviluppare un sistema che lavorava con un getto a 15 MPa che si rivelò efficacissimo per coltivare i propri giacimenti di gilsonite, materiale che non è estraibile con altri metodi.

Le esperienze citate accesero l'interesse a livello mondiale. Nei primi anni cinquanta la Consolidation Coal Co. compì una serie di prove sul campo negli U.S.A. utilizzando un getto generato dalla pressione di 100 MPa. Si vide come la tecnologia era idonea in ambienti polverosi. A causa del grande consumo d'acqua ($2500 \div 3000$ l/min), che poneva alcune restrizioni nel caso del carbone, le progettazioni si spostarono verso tecnologie *waterjet* ad alta pressione e piccola portata.

Negli anni sessanta l'applicazione di questi sistemi a 150 MPa a una grande varietà di giacimenti minerari venne effettuata da ingegneri minerari in Germania, Russia, Polonia, Inghilterra, Cina e U.S.A. Nel 1964 ÷ 1965 ingegneri polacchi e russi condussero prove industriali in miniere in sottoterraneo coltivate per lunghe fronti adoperando una lancia *waterjet* applicata alla macchina di scavo.

Durante gli anni settanta furono numerose le attività in cui vennero utilizzati getti a percussione e cavitanti generati a $100 \div 150$ MPa allo scopo di taglio, estrazione, perforazione e pulitura di vari tipi di materiali.

Oggi i getti d'acqua sono impiegati in diverse operazioni minerarie, sia a giorno che in sottoterraneo. In Inghilterra i giacimenti caolinici e negli U.S.A. i depositi a fosfati della Florida vengono regolarmente coltivati con *monitor* a grande gittata. Diversi sono gli esempi, soprattutto in Europa, di abbattimento del carbone con sistemi idraulici.

L'interesse della ricerca applicata per il taglio con acqua ha registrato un notevole aumento negli ultimi quaranta anni man mano che la tecnologia meccanica (e idraulica) mettevano a disposizione materiali e attrezzature che potessero lavorare a pressioni elevate.

Conseguentemente la tecnologia trova impiego corrente nel campo della pulitura, per lavori di demolizione, modifica delle strutture in calcestruzzo, taglio di svariati materiali, dalla carta ai metalli.

2.2. Usi industriali del *waterjet*

Le applicazioni della tecnologia dei getti d'acqua ad alta pressione variano in funzione delle caratteristiche dei getti, tipo, pressione, portata, presenza o meno di additivi e/o abrasivi. Nella Figura 2.2 sono schematizzate alcune applicazioni della tecnologia in funzione della portata e della pressione dei getti.

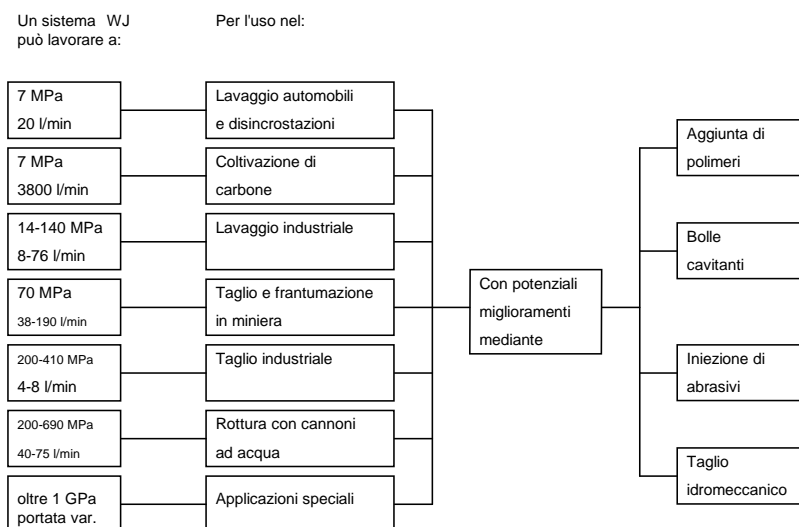


Figura 2.2 - Usi industriali del *waterjet* in funzione di pressione e portata

2.2.1 Ingegneria mineraria

Come esposto nella storia dell'evoluzione della tecnologia, i getti in pressione erano utilizzati soprattutto nella coltivazione del carbone (idroescavazione).

Il taglio della roccia divenne veramente attuabile quando l'alta pressione poté essere combinata con l'azione meccanica dell'utensile.

L'uso dei soli getti d'acqua stazionari per il taglio fu più lento a decollare. L'efficacia dei getti d'acqua di alta pressione per il taglio del granito fu dimostrata già negli anni settanta, tuttavia le prime macchine non erano capaci di tagliare i blocchi nelle dimensioni richieste dalle operazioni a valle dell'estrazione (segazione nei telai).

Nel 1984 venne costruito nei pressi della University of Missouri-Rolla (USA) un complesso megalitico simile a quello di Stonehenge in modo da dimostrare definitivamente l'estrema affidabilità della tecnologia *waterjet*.

Un'altra applicazione del *waterjet* nell'ingegneria mineraria è quella del dragaggio, ovvero l'escavazione di sedimenti sott'acqua. Utilizzando un getto ad una pressione di circa 7 MPa con ugello da 20 mm, si realizzano fori profondi più di 1,5 m in circa tre minuti. La principale applicazione in questo campo comunque riguarda la rimozione di materiali incoerenti sottomarini, in modo da scoprire il minerale utile che viene poi aspirato mediante pompa a suzione.

2.2.2 Pulitura industriale e disincrostazione

Il lavaggio in pressione comincia la sua storia nel mondo dell'industria con la pulitura a vapore agli inizi di questo secolo. Successivamente il vapore venne usato per potenziare getti di acqua calda, e con lo sviluppo delle pompe e dei macchinari si ottennero getti guidati per la pulitura industriale.

Già trent'anni fa la Shell ne faceva uso nei suoi impianti di raffinazione del petrolio.

Gli impianti di pulitura sono molto semplici, pur esistendo in molte varianti, il modello base consiste in una piccola pompa, che eroga l'acqua alla lancia mediante un lungo tubo flessibile ad alta pressione. Mediante una leva di comando l'operatore fa fluire l'acqua attraverso l'ugello. La pressione del getto è variata secondo la necessità, mentre la sua portata è regolata dal diametro dell'ugello. È da notare che la bassa forza di reazione del getto d'acqua torna a vantaggio dell'operatore.

Dal momento che le operazioni di pulizia riguardano la rimozione di materiale (depositato o incrostato) da ampie superfici, per velocizzare il lavoro si fa uso di getti a ventaglio. Un'altra soluzione per migliorare il lavoro di pulitura (soprattutto nella rimozione di idrocarburi), consiste nell'usare getti d'acqua caldi oltre gli 85 °C. Il calore però viene fornito all'acqua solo dopo che essa è uscita dalla pompa per evitare problemi di cavitazione (l'acqua entra nella pompa alla temperatura di circa 49 °C).

Nell'industria del lavaggio delle automobili o di superfici verniciate in genere, si fa uso di getti d'acqua con additivi chimici, che hanno lo scopo di abbassare la tensione superficiale favorendo l'asportazione della sporcizia. Naturalmente il fatto che l'impatto dell'acqua sulla superficie duri una frazione di millesimo di secondo, porta al fatto che gli additivi devono essere applicati sulla superficie prima dell'arrivo del getto.

Più recentemente, nelle operazioni di pulizia, viene fatto uso di getti a bolle cavitanti e getti abrasivi.

L'operazione di disincrostazione, viene fatta molto attentamente dal momento che devono essere rimosse le zone ove nasce la corrosione.

2.2.3 Ingegneria civile

In tale ramo industriale l'uso più diffuso del getto d'acqua è indirizzato alla rimozione dell'asfalto e del cemento danneggiato dalle strutture.

Con il miglioramento della tecnologia, l'ingegneria civile ha sfruttato la tecnica dei getti d'acqua a suo vantaggio anche per altre applicazioni: attualmente si inietta in pressione mix di cemento in fori eseguiti in precedenza per migliorare la tenuta della struttura.

Tale tecnica è tuttora utilizzata nello scavo delle gallerie secondo il metodo NATM, dove delle strette colonne di cemento vengono poste quasi orizzontalmente in linea con la direzione del tunnel, in modo da creare un tetto di protezione prima dell'avanzamento dello scavo.

2.2.4 Usi militari

È noto che i rifiuti radioattivi vengono spesso messi a dimora in miniere sotterranee di sale; tuttavia a causa di una serie di ragioni, questi rifiuti devono essere spostati. Spesso però i contenitori risultano contaminati, e pertanto l'operazione di rimozione deve essere eseguita necessariamente con l'ausilio di robot. Grazie alla sua bassa forza di reazione il getto d'acqua ha la capacità di effettuare il taglio del metallo per realizzare una finestra attraverso la quale i rifiuti possono essere rimossi (Summers 1994.).

La tecnica del taglio a freddo dei metalli senza generazione di scintille è stata estesa per realizzare la "liquidazione" di arsenali militari (grandi proiettili e missili con testata tradizionale o nucleare) utilizzando getti abrasivi per tagliare l'ogiva e asportando la sostanza pericolosa con lavaggio ancora eseguito con getto d'acqua.

Il concetto della guida robotizzata è applicato anche al caso dello smantellamento di centrali nucleari obsolete per la rimozione selettiva delle sostanze radioattive che vengono raccolte in contenitori e smaltite.

Un'ultima importante applicazione riguarda le operazioni di risanamento dei campi minati nelle quali il getto viene impiegato per la localizzazione delle mine e il loro brillamento a distanza in condizioni di sicurezza.

2.2.5 Usi nel campo della medicina

La possibilità di controllare la potenza del getto usando pressioni limitate e diametri molto piccoli (fino a 0,05 mm) consente l'uso del *waterjet* per applicazioni mediche e chirurgiche, soprattutto quando è richiesta un'azione selettiva su organi di diverse caratteristiche di resistenza.

Sono ben note le applicazioni, in campo dentistico e per la frantumazione dei calcoli, ma esistono altri esempi che dimostrano l'interesse della tecnica per scopi curativi.

Basta citare la pratica dell'iniezione intramuscolare con siringhe a microgetto senza ago, tecnica che permette produttività eccezionali. Altro esempio è dato dalle operazioni al fegato per l'asportazione di tumori, che ora vengono correntemente eseguite con bisturi *waterjet*, con il vantaggio di incidere a freddo i tessuti senza danneggiarli, lasciando inalterata la rete dei vasi (Ciccu e Massacci 1993).

2.3 Tipi di getto d'acqua

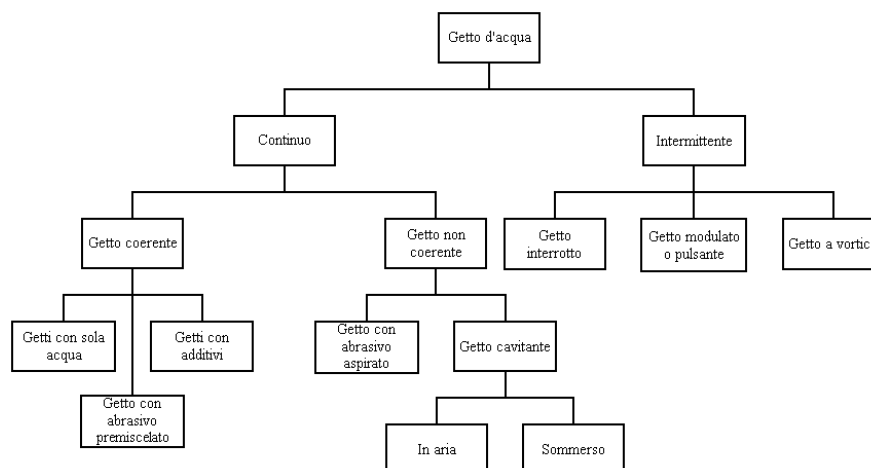


Figura 2.3 - Classificazione dei getti d'acqua

Questo diagramma descrive come sia diffusa largamente la tecnologia dell'alta pressione e le variabili che devono essere considerate per un uso idoneo.

2.3.1 Getti stazionari

Vengono chiamati anche getti continui in quanto presentano caratteristiche idrodinamiche costanti nel tempo in ciascun punto del profilo. Il getto stazionario è facilmente ottenibile con ugelli di forma semplice il che spiega la sua larga diffusione nell'industria.

Negli impianti di taglio possono essere trattati i materiali listati nella Tabella 2.1.

Tabella 2.1- Prestazioni di taglio con getto a sola acqua (Summers e Mazurkiewicz 1991)

MATERIALE	SPESSORE [mm]	VELOCITÀ DI TAGLIO [cm/s]	DIAMETRO UGELLO [mm]	PRESSIONE GETTO [MPa]
Cartone increspato	7,87	332,7	0,254	390
Carta vetrata (120)	Uno strato	203,2	0,127	274
Tappeto di gomma	18,29	12,7	0,152	377
Cuoio conciato	1,52	127,0	0,127	274
Pannelli di amianto	18,0	152,4	0,203	196
Pannelli isolanti	50,8	166,6	0,203	196
Piastre gommate	3,15	15,2	0,127	377
Uretano	2,03	10,2	0,102	377
Cristallo isolante	304,8	42,2	0,152	342
Policarbonato	2,16	2,03	0,152	377
Polipropilene	2,03	6,10	0,102	377
Poliestere	12,70	61,0	0,152	377
PVC	0,76	30,5	0,102	377
Pannelli in PC (FR-4)	1,58	5,08	0,152	377
SMC	3,05	101,6	0,152	342
Compositi in grafite	1,65	1,52	0,152	377
Vetro	1,77	4,17	0,203	390
Grafite	3,05	3,35	0,203	390
Stecca di arachidi	10,67	10,16	0,127	274
Formica	1,27	61,0	0,127	342
Gommapiuma	50,8	10,16	0,127	377

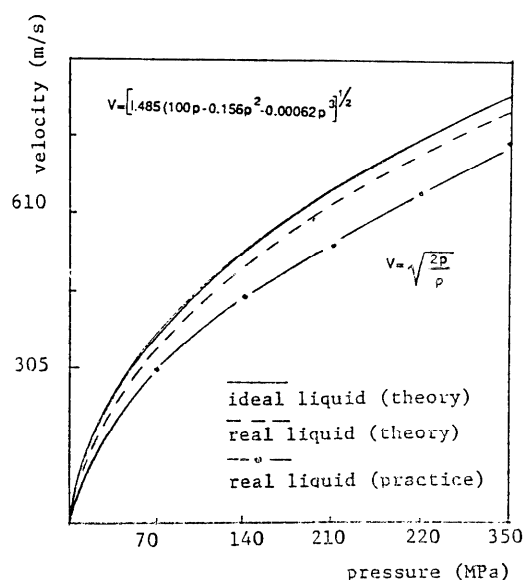


Figura 2.4 - Relazione tra velocità e pressione nei liquidi ideali e reali (in teoria e in pratica)

La velocità del getto dipende esclusivamente dalla pressione dell'acqua e non è influenzata dalla geometria dell'ugello (Summers & Mazurkiewicz, Giugno 1991). Tale velocità può essere calcolata dalla pressione usando un'equazione relativa ai fluidi incompressibili.

La portata del getto è così calcolata moltiplicando l'area della sezione del getto per la sua velocità; la sezione del getto può essere messa in relazione con la sezione dell'orifizio dell'ugello mediante il coefficiente di deflusso, che dipende dalla forma dell'ugello. Tutti i calcoli che seguiranno sono fondati sul teorema di Bernoulli valido per liquidi ideali, anche se l'esperienza ha dimostrato che un liquido reale spinto attraverso un ugello si comporta in modo differente rispetto a uno ideale (Figura 2.4).

Se v è la velocità del getto e d il diametro dell'ugello, il volume d'acqua Q pompato attraverso l'ugello nell'unità di tempo è dato dall'equazione:

$$Q = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}} \quad (2.1)$$

Essendo, secondo il teorema di Bernoulli:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}} \quad (2.2)$$

p la pressione del getto

ρ la massa volumica dell'acqua.

La massa m_t di acqua uscente da un ugello di diametro d nell'unità di tempo sarà:

$$m_t = \rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}} \quad (2.3)$$

La forza di reazione e la potenza del getto d'acqua sono espressi da:

$$F = m_t \cdot v \quad \text{e} \quad P = Q \cdot p \quad (2.4)$$

Tutti questi calcoli sono relativi a liquidi ideali e a una perfetta eiezione dell'ugello (coefficiente di deflusso pari a 1,0).

Se si tiene conto del coefficiente d'efflusso, il quale esprime il fenomeno di contrazione che subisce il getto all'uscita dall'orifizio, si ricava la portata:

$$Q = C_D \cdot v \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.5)$$

dove Q è la portata [m^3/s], d il diametro dell'orifizio [m], v la velocità dell'acqua [m/s] e C_D il coefficiente di contrazione.

Sostituendo l'espressione della velocità nell'equazione della portata, si ha:

$$Q = C_D \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.6)$$

Infine, moltiplicando la portata per la pressione totale, si ottiene la potenza idraulica del getto:

$$W = p_t \cdot Q = p_t \cdot C_D \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.7)$$

In condizioni di pressione atmosferica, per effetto della resistenza dell'aria, il getto d'acqua tende a sfrangiarsi all'aumentare della distanza dall'ugello, fino alla sua completa nebulizzazione, quindi al crescere della distanza tra l'orifizio di uscita e il materiale da tagliare, il getto d'acqua perde energia, ed è quindi in grado di realizzare solchi sempre più larghi ma meno profondi, compatibilmente con la natura e la resistenza del materiale.

Di conseguenza, l'efficacia del taglio è condizionata dalla distanza tra l'orifizio di uscita e il materiale da tagliare: perciò ciascun dispositivo *waterjet* è caratterizzato da una distanza di taglio ottimale, la quale dipende da diversi parametri, fra cui principalmente il diametro e la conformazione dell'ugello.

2.3.2 Getti pulsanti o modulati

Grazie ad una configurazione della camera di eiezione, ove sono posti degli ostacoli programmati, il getto esce con portata pulsante, sfruttando anche i fenomeni di risonanza che si formano all'interno della camera.

Si è osservato nelle sperimentazioni che questi getti hanno un migliore impatto dinamico sull'obiettivo.

La spiegazione di questo la troviamo nella meccanica dei fluidi: la pressione istantanea al momento dell'impatto liquido-solido, è stata misurata nell'ordine di 2-3 volte la pressione del colpo d'ariete che come sappiamo è data da:

$$p_{c.a.} = \rho \cdot C_0 \cdot v \quad (2.8)$$

essendo C_0 la celerità del suono nell'acqua.

In realtà tenendo conto del fatto che l'acqua è comprimibile, la pressione del colpo d'ariete può essere espressa dall'equazione ben approssimata:

$$p_{c.a.} = \rho \cdot \left(C_0 \cdot v + 2 \cdot v^2 - \frac{0,1 \cdot v^3}{C_0} \right) \quad (2.9)$$

Il colpo d'ariete ha una pressione molto più alta della pressione di ristagno alla quale la

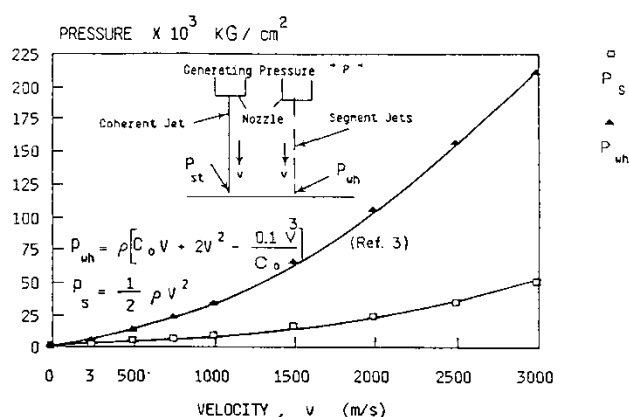


Figura 2.5 - Confronto tra le pressioni di colpo d'ariete e ristagno in funzione della velocità (Summers e Mazurkiewicz 1991)

pressione d'impatto cala e che è data (per un liquido incompressibile) da:

$$p_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2.10)$$

pertanto per usufruire il più possibile della pressione d'impatto, sono stati studiati e prodotti i getti pulsanti e i getti interrotti. Un confronto tra le pressioni di colpo d'ariete e di ristagno è mostrata in Figura 2.5.

2.3.3 Getti interrotti

Sono un'esaltazione dei getti pulsanti, vengono formati dei veri proiettili d'acqua separati l'uno dall'altro incrementando l'effetto dinamico. Possono essere ottenuti ponendo davanti all'ugello un disco forato che ruota ad altissima velocità. Tuttavia questo metodo va bene solo per le ricerche di laboratorio. Negli impianti industriali si preferisce agire a monte dell'ugello mediante dispositivi azionati da impulsi ad alta frequenza (piezoelettrici o magnetici) o bersagliando lo stesso con impulsi laser ad altissima frequenza, in modo da rendere intermittente il getto per evaporazione istantanea di segmenti alternati.

2.3.4 Getti cavitanti

Questi getti sfruttano la possibilità di creare dei fenomeni di cavitazione generando nel liquido bolle di vapore che implodendo generano impulsi di pressione molto alti ($100 \div 200 \text{ MPa}$).

Un primo tipo di getto cavitante è quello a *cavitazione esterna al getto*. Generato in ambiente sommerso, viene utilizzato soprattutto nella disincrostazione della chiglia delle navi. Infatti tali getti determinano delle zone di erosione piuttosto che tagli precisi.

Il secondo tipo è detto a *cavitazione interna al getto* (sono chiamati anche getti autocavitanti): le bolle di cavitazione sono generate ponendo un ostacolo nella cavità dell'ugello.

I vantaggi che i getti d'acqua ad alta pressione hanno portato all'industria rispetto alle altre tecnologie sono riassunti nella Tabella 2.2.

Tabella 2.2 - Vantaggi della tecnologia di taglio con getto d'acqua ad alta pressione

Abbattimento delle polveri
Assenza di scintille
Temperature basse, e dunque trascurabile stress da calore (la temperatura massima è di circa 40°C)
Minima deformazione del materiale in quanto il getto esercita una forza molto limitata durante il taglio
Nessun rallentamento né inceppamento della macchina
Scarsa produzione di detriti
Taglio e finitura in un unico passaggio
Possibilità di iniziare e finire il taglio in qualsiasi punto e in qualsiasi momento
Spesso non necessita di fori iniziali
Possibilità di effettuare tagli con profili netti e regolari
Il getto è puro, dunque può essere utilizzato per prodotti alimentari come cibi surgelati, oppure, usando getti di

alcol, per prodotti medici

Insostituibile nel taglio di materiali cellulari e multistrato

La forma del taglio è facile da eseguire come un disegno a matita: può essere effettuato manualmente o con l'elaboratore

Riesce a tagliare in condizioni sfavorevoli.

I quattro tipi di getto appena descritti, fanno uso di sola acqua o tutt'al più qualche polimero a catena lunga. Diverso è il caso dei getti abrasivi nei quali, l'acqua gioca un ruolo completamente diverso: il liquido ha qui essenzialmente la funzione di accelerare trasportare le particelle abrasive che sono incorporate nel getto e proiettarle contro il materiale da tagliare.

2.3.5 Getti abrasivi

A dispetto del fatto che lo sviluppo di questa tecnologia sia piuttosto recente, i getti abrasivi sono destinati ad entrare in concorrenza con altre tecnologie di taglio industriale quali il taglio al plasma e taglio con laser. Sono infatti utilizzati per il taglio di precisione di materiali come acciaio, granito ecc. (Tabella 2.3)

Tabella 2.3- Prestazioni di taglio con getto abrasivo (Summers e Mazurkiewicz 1991)

Materiale	Spessore [mm]	Velocità di taglio [cm/s]	Diametro ugello [mm]	Pressione [MPa]
Acciaio Inox	20,1	0,085	0,457/1,58	205
Titanio	3,18	0,762	0,457/1,58	205
Alluminio	25,4	0,085	0,457/1,58	205
Vetro per specchio	4,83	1,27	0,457/1,58	205
Pannelli in ceramica	0,71	0,085	0,457/1,58	205

A differenza degli impianti che utilizzano la sola acqua, in questo caso le parti meccaniche che si trovano a contatto con la sospensione acqua-abrasivo presentano un logorio superiore. Tale fatto si nota in modo particolare nell'ugello, il quale viene costruito con materiali particolarmente resistenti (carburo di boro o di tungsteno) che consentono di ottenere una vita media di 250÷500 ore.

La quantità di abrasivo da utilizzare è soggetta a limitazioni tecnico-economiche che portano ad una concentrazione massima del 25 % in volume. Concentrazioni maggiori implicano consumi elevati delle vie di distribuzione e favorisce i rischi di intasamento.

I materiali abrasivi utilizzati nell'industria possono trovarsi in natura come le sabbie silicee, i granati e l'olivina, o prodotti artificialmente come la graniglia metallica, solo per citarne alcuni.

La testa di taglio è guidata da elaboratore elettronico che comanda la posizione dell'ugello sul bersaglio con coordinate X e Y.

A seconda delle modalità di produzione del getto d'acqua abrasivo, si distinguono tre tipi di sistema:

AWJ (Abrasive Water jetting): sistemi ad abrasivo trascinato, dove l'abrasivo è alimentato a secco in una camera di miscelazione a valle del getto primario ad alta pressione, da cui viene inglobato attraverso un tubo focalizzatore coassiale;

AWJs: sistemi ad abrasivo premiscelato, in cui l'abrasivo è introdotto in un recipiente, successivamente pressurizzato, dal quale il flusso della sospensione acqua - abrasivo raggiunge l'ugello tramite un tubo flessibile;

DIA-Jet (Direct Injection Abrasive Jet), in cui la miscelazione avviene in un serbatoio in pressione attraverso un *by-pass* che ripartisce il flusso d'acqua in due parti (in genere 90% e

10%). L'abrasivo così miscelato al getto d'acqua viene trasportato in sospensione, e ciò permette anche il suo recupero per un eventuale riutilizzo, considerati i costi elevati del materiale. Inoltre, il getto ottenuto è costituito per oltre il 90% in peso da acqua, quindi è meno rumoroso perché privo di aria. Ciò consente di ottenere anche un'elevata capacità di raffreddamento del materiale tagliato, riducendo la probabilità di formazione di scintille e rendendo applicabile questa tecnologia anche in presenza di sostanze infiammabili. Allo stato attuale, il sistema *Dia-Jet* può operare con diametri d'ugello superiori al decimo di millimetro e pressioni relativamente basse (inferiori a 70 MPa), benché siano allo studio numerose soluzioni finalizzate ad incrementare la pressione ed ottenere una migliore qualità di taglio con un consumo inferiore di abrasivo.

Tabella 2.4 - Vantaggi della tecnologia di taglio con getto d'acqua abrasivo

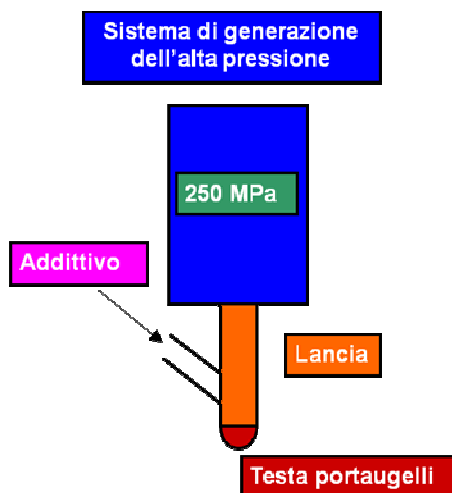
per piccole distanze di stand-off (specialmente per materiali spessi) o se il getto è intercettato subito all'uscita del taglio, il getto abrasivo è più sicuro degli utensili meccanici
il rumore raggiunge il livello di 85-95 dB. La maggiore causa di rumore deriva dal fatto che il getto all'uscita dell'ugello viaggia con velocità superiore a quella del suono
l'attrezzatura è facilmente reperibile sul mercato anche per pressioni superiori a 410 MPa
i tubi flessibili sono disponibili con una pressione di sicurezza di 240 MPa e sono collaudati sino a 500 MPa
facile messa in opera
nessuna vibrazione indotta
produce pochissimi detriti
nessuna emissione di radiazioni
nessuna creazione di polvere
lavori veloci e costi contenuti
tagli in qualunque direzione
nessun rischio di incendi
possibilità di integrarsi con utensili meccanici.

2.4 Il sistema *waterjet*

La prima parte di un sistema *waterjet* consiste nella pompa ad alta pressione e comprende il motore, Diesel o elettrico, che ne consente il funzionamento. Se necessario, l'impianto deve essere provvisto di un serbatoio per l'acqua pressurizzata.

L'acqua è erogata dalla pompa al punto di taglio attraverso tubazioni ad alta pressione. Le connessioni ai tubi sono fatte mediante l'uso di giunzioni ad altissima pressione. La parte finale della tubazione ha una terminazione conica. Essa viene infilata e forzata all'interno di un corrispondente sito combaciante mediante dadi di serraggio. Oggi si producono tubi flessibili che resistono sino alla pressione di 500 MPa. Alla fine della lancia è montato l'ugello.

L'ultimo elemento dell'impianto *waterjet* consiste in un ammortizzatore del getto liquido: esso è necessario per garantire la sicurezza e contenere il rumore.

Figura 2.6 - Schema di un sistema *waterjet*

2.4.1 Le pompe

La potenza idraulica può essere generata sia a bassa (100-250 MPa), sia a media (250-400 MPa) che ad alta pressione (>400 MPa). Il primo intervallo è generalmente coperto dalle pompe monostadio a pistoni, semplici e robuste, mentre oltre i 250 MPa si devono usare i sistemi a doppio stadio a intensificatore di pressione, che sono più costosi e meno affidabili nel tempo. Queste pompe ad altissima pressione (250-500 MPa), usate specialmente nel taglio mediante getto d'acqua abrasivo, sono macchine a due stadi, il primo dei quali è una semplice centralina di compressione oleodinamica. È da notare che poiché l'acqua ha una comprimibilità del 12% alla pressione di 410 MPa, non esce acqua dall'intensificatore durante il primo ottavo del suo ciclo. Tuttavia durante questo tempo il getto deve essere operante. Pertanto l'intensificatore deve essere accompagnato da un accumulatore di acqua ad alta pressione. Questo non ha parti in movimento e funziona come un semplice serbatoio di acqua ad alta pressione.

Recentemente sono state proposte anche delle pompe centrifughe multistadio, ma non sono ancora disponibili sul mercato. La produzione di acqua ad alta pressione necessaria al sistema *waterjet* può essere infatti ottenuta usando una pompa cinetica (centrifuga multistadio). In essa l'aumento di pressione è dato dalle forze centrifughe e dalla conversione dell'energia cinetica del fluido in energia di pressione.

I vantaggi della pompa cinetica consistono nell'avere una lunga vita tecnica, e nel produrre un flusso continuo e uniforme, cosicché non è richiesto l'accumulatore di acqua pressurizzata (Larjola 1992). Inoltre sono di costruzione semplice, occupano poco spazio e non presentano problemi all'avvio né alla fermata.

La pompa cinetica presenta lo svantaggio di avere una efficienza più bassa rispetto alle pompe ad intensificatori. Ma poiché l'energia spesa per il suo funzionamento rappresenta solo una piccola parte di quella totale necessaria all'operazione di taglio, tale svantaggio viene recuperato.

Nei sistemi *waterjet*, sono comunque necessarie pompe cinetiche particolari che non si reperiscono facilmente sul mercato, in quanto con quelle normali non si riesce ad ottenere una combinazione alta pressione/piccola portata.

Pertanto nelle operazioni di cava, dove il primo problema è l'affidabilità associata ad una facile manutenzione e alle prestazioni di lavoro a 150 - 200 MPa, la pompa monostadio con pistoni multipli (3 o 5) è preferibile alla pompa ad intensificatori.

Per quanto riguarda il numero di pistoni è da notare che minore è il numero dei pistoni, maggiormente ne risente la stazionarietà della portata. D'altra parte un alto numero di pistoni,

causa una più alta frequenza di pulsazione della portata (Summers e Mazurkiewicz 1991). Comunque, in caso di necessità, l'acqua utilizzata può essere fatta ricircolare dopo una chiarificazione permettendo alle particelle sospese di sedimentare in un bacino di raccolta con l'aiuto di flocculanti.

È importante che l'acqua sia libera da sali disciolti, ioni, specialmente calcio e magnesio che possono precipitare all'interno della pompa sotto l'elevata pressione dell'acqua creando incrostazioni.

2.4.2 La lancia *waterjet*

Per condurre uno scavo profondo alcuni metri dentro la roccia, bisogna che la lancia possa penetrare all'interno del taglio.

Il problema si risolve in modo pratico usando una lancia traslante provvista di uno o più getti, generati da ugelli rotanti o oscillanti, o con un numero di getti angolati fuoriuscenti da una testa oscillante sul piano del taglio.

Un unico getto stazionario traslante infatti non approfondisce lo scavo per più di qualche cm, pertanto per avere tagli più profondi bisogna allargare il solco permettendo alla lancia di penetrare.

Nel caso dei getti multipli traslanti, abbiamo tre o più ugelli, inseriti nella testa porta ugelli, che si muovono parallelamente al fronte di taglio.

2.4.3 Gli ugelli

La configurazione degli ugelli è essenziale per il buon funzionamento dell'operazione anche se molto spesso se ne trascura l'importanza (Summers e Mazurkiewicz 1991).

Il primo importante studio sul disegno degli ugelli per getto d'acqua fu eseguito da Rouse nel 1951. L'ugello messo a punto (Figura 2.7) venne usato per i getti d'acqua in caso di incendi.

Successivamente (1965) gli inglesi Leach e Walker eseguirono approfonditi studi sugli ugelli impiegati nei getti ad alta pressione per il taglio della roccia, al fine di individuare il modello ottimale.



Figura 2.7 - Progetto ottimale degli ugelli di Rouse e Nickonov & Shavlovskii

Questo fu trovato nel disegno dell'ugello a forma conica di Nickonov e Shavlovskii sviluppato in Russia mostrato nella Figura 2.7 .

Operando uno studio di confronto , Leach e Walker trovarono che il modello russo era molto migliore dell'ugello proposto da Rouse, in quanto il primo permetteva all'acqua di raggiungere velocità maggiori a parità di altre condizioni. Pertanto i due inglesi svilupparono il modello di Nickonov.

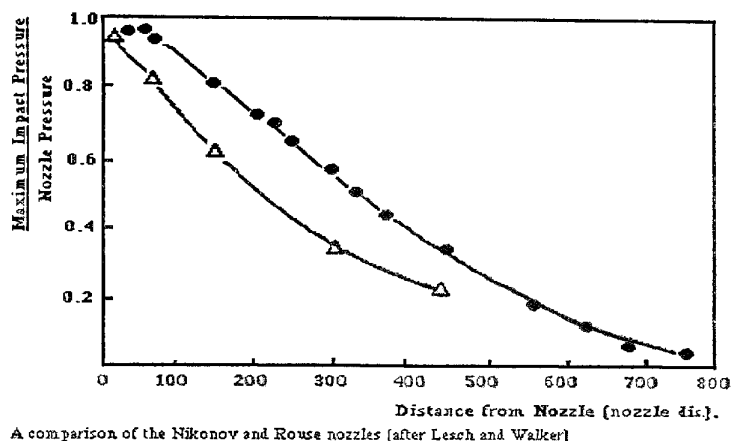


Figura 2.8 - Confronto fra le prestazioni dei due ugelli (Leach e Walker).

Altri studiosi proposero ulteriori tipi di ugelli con profilo interno di forma iperbolica, esponenziale, parabolica, ecc., ma la conclusione generale fu che il modello di Nikonov e Shavlovskii sviluppato da Leach e Walker sembra insuperabile in termini di costi, facilità di fabbricazione e prestazioni.

Un altro aspetto del buon disegno dell'ugello è espresso dal coefficiente di deflusso, che dà la misura della sua capacità di produrre un getto coerente al di fuori dell'orifizio. Un disegno scadente dell'ugello può avere un valore dell'ordine di 0,56, ovvero viene ottenuto solo il 56% del flusso previsto attraverso l'orifizio. Un buon ugello raggiunge coefficienti di scarico di circa 0,95.

Le prestazioni della disintegrazione dipendono dal tipo di ugello e dalla sua configurazione. Nella perforazione e nel taglio con getti d'acqua paralleli, il dimensionamento dell'ugello (inclinazione, numero, dimensioni e posizione) deve essere basato sulle proprietà tessiturali e strutturali della roccia dal punto di vista delle prestazioni. È molto difficile trovare una soluzione che sia appropriata per ogni tipo di roccia.

È noto che negli ugelli convergenti, la dispersione energetica causata dallo sfrangiamento del getto è raggiunta ad una distanza molto più grande rispetto agli ugelli ad orifizio cilindrico. Un angolo di convergenza pari a 30° con una lunghezza pari a quattro volte il diametro sembra il più efficiente.

Gli ugelli sono soggetti a consumo durante le operazioni di taglio e devono essere sostituiti in modo da garantire un'ottima prestazione dei getti. La durata dell'ugello dipende dal diametro dell'orifizio, e dal materiale di cui esso è fabbricato. Il consumo al suo interno è causato dall'abrasione di particelle estranee e da bolle cavitanti, il consumo esterno è dovuto all'urto con la roccia tagliata o con le sue schegge.

Ragioni economiche suggeriscono che una pressione moderata e pochi ugelli di grande diametro dovrebbero essere usati invece di disperdere la potenza idraulica tramite un alto numero di getti più piccoli che danno un peggior uso dell'energia (l'energia specifica decresce con l'aumento del diametro del getto alla stessa potenza idraulica).

Inoltre ugelli più piccoli si consumano prima e sono generalmente più costosi.

2.5 L'efficacia del getto d'acqua

2.5.1 Introduzione

Dal punto di vista sperimentale, si è appurato che i parametri fondamentali da tenere in considerazione per la caratterizzazione dell'efficacia di taglio e penetrazione di un getto d'acqua sono:

- pressione del getto;
- portata del getto;
- distanza di impatto (*stand - off distance*);
- diametro dell'ugello;
- velocità di traslazione della lancia;
- direzione del getto.

Ciascuno di questi parametri è inoltre condizionato dalle caratteristiche proprie del materiale da trattare, e in particolare la resistenza meccanica, la presenza di piani di fessurazione, la composizione mineralogica.

Pertanto, la regolazione delle condizioni ottimali per il taglio è un processo molto lungo e complicato, a causa del gran numero di variabili che intervengono e interagiscono tra loro, singolarmente o in reciproca correlazione.

La profondità del taglio dipende prevalentemente dalla distanza di impatto (cui è inversamente proporzionale), dalla pressione e dal tempo di permanenza del getto sul bersaglio (cui è direttamente proporzionale).

2.5.2 Pressione del getto

La pressione del getto è quella statica dell'acqua all'uscita dal sistema di pressurizzazione; affinché possa realizzarsi l'azione di taglio, è necessario che questa sia superiore a un valore minimo di pressione, detto *pressione critica*, caratteristico per ogni materiale, mentre al di sotto di esso il getto d'acqua è inefficace.

2.5.3 Portata, potenza idraulica, energia specifica del getto

Oltre che dalla pressione, la profondità del taglio dipende dalla portata d'acqua attraverso una relazione di proporzionalità diretta. Il prodotto della pressione (p) per la portata (Q) esprime la *potenza idraulica*:

$$W = p \cdot Q \quad (2.11)$$

E' quindi evidente che una maggiore potenza può essere ottenuta aumentando la pressione oppure la portata. Tuttavia, per W costante, l'efficacia del taglio è maggiore quando, superata la pressione critica, si aumenta la portata e non la pressione.

L'*energia specifica*, (energia spesa per unità di volume) è data dal rapporto tra la potenza idraulica e il volume trattato dal getto nell'unità di tempo (V):

$$E_s = \frac{W}{V} \quad (2.12)$$

2.5.4 Distanza d'impatto

La distanza d'impatto del getto (*stand - off distance*) è la distanza tra l'orifizio di uscita dell'acqua e la superficie da tagliare; all'aumentare di essa, diminuisce la profondità del taglio. La pratica sperimentale ha dimostrato che tale distanza può raggiungere fino a 50 volte il diametro dell'orifizio senza che il getto subisca apprezzabili diminuzioni di efficacia.

2.5.5 Diametro dell'ugello

Il diametro dell'ugello è un parametro che concorre in maniera decisiva alla realizzazione di un getto efficace: infatti, all'aumentare di esso, la profondità di taglio cresce in maniera più che proporzionale, mentre la pressione critica tende a diminuire.

2.5.6 Velocità di traslazione del getto

Si tratta della velocità con cui si muove la testa portaugelli rispetto al materiale da tagliare; al crescere di tale velocità (v), diminuisce la profondità del solco (h).

Il legame tra questi due parametri è espresso dalla seguente relazione empirica:

$$h(v) = K \cdot v^{-y} \quad (2.13)$$

dove K e y sono due costanti dipendenti dal materiale considerato.

2.5.7 Direzione d'impatto

La direzione d'impatto si individua attraverso l'angolo formato tra il getto e la superficie di contatto acqua - materiale.

Tale parametro deve essere stabilito con la finalità di sfruttare al meglio il potenziale energetico dell'acqua: pertanto, per materiali fragili, l'inclinazione ottimale è di 90° , mentre per angoli inferiori si verifica una certa riflessione del getto. Per materiali duttili si impiega di solito un angolo di 20° .

3 *L'applicazione dei sistemi a getti d'acqua ad alta velocità ai terreni*

3.1 Introduzione

La tecnologia del getto d'acqua ad alta velocità nasce, per l'escavazione del carbone ma trova il suo maggior sviluppo, vista la sua capacità di concentrare grandi energie su piccole superfici, nel taglio dei materiali duri come lapidei, metalli e altro.

Ad oggi sono pochissime le ricerche e le esperienze della sua applicazione ai materiali granulari e queste sono orientate al:

- il consolidamento dei terreni (*jetgrouting*, *soil mixing*) – sono tecniche a minor pressione, ma a maggior portata rispetto al *waterjet*;
- lo scavo o il supporto allo scavo;
- la bonifica delle terre contaminate;

Gli studi più numerosi sono stati rivolti al consolidamento delle terre con la tecnica del *jetgrouting*, il quale oggi, grazie alla sua resa e alla sua economicità, trova numerose applicazioni sia nell'ingegneria geotecnica (es. realizzazioni di fondazioni), sia in campi più propriamente legati alla difesa dell'ambientale come per esempio la messa in sicurezza dei siti contaminati o delle discariche, attraverso la realizzazione di superfici impermeabili.

Ad oggi esiste pochissima letteratura riguardo questo tema. Gli studi più completi sono quello sviluppato da (Yoshida, et al. 1989) in cui viene studiato l'effetto dei parametri di generazione del getto su un singolo tipo di terreno e quelli di Atmatzidis & Ferrin, 1987 in cui, a parità di parametri di generazione, viene studiato l'effetto su diversi terreni, in diverse condizioni. Nel seguito è riportata una sintesi di entrambi, e di altri più recenti per taluni aspetti affini a quello qui proposto.

Le ricerche più recenti sono rivolte alla possibilità di utilizzo nella bonifica dei siti contaminati (R. Ciccu, A. Bortolussi e M. Cigagna, et al. 2006) (Cable, et al. 2006). Le tradizionali tecniche di risanamento dei terreni contaminati (es. *vapor extraction*, *soil flushing*, *stream stripping*, *bioremediation*, *bioventing*, e *air sparging*) (EPA 2001) sono difficilmente applicabili quando i terreni sono poco permeabili. In queste condizioni i getti d'acqua ad alta velocità possono essere usati per aumentare la conducibilità idraulica, attraverso un'azione di mobilizzazione ed estrazione della frazione fine. La rimozione selettiva mediante pompaggio di acqua ad alta pressione delle frazioni fini di terreno in cui, nella maggioranza dei casi (circa il 90%), si trova adsorbito il contaminante, (tecnica nota come *upflow washing*) ha già conseguito ottimi risultati, sia nel trattamento di inquinamento da NAPL, sia in quello da metalli pesanti (Niven e Khalili 1998).

Se nei terreni fini dunque l'obiettivo è quello di aumentare la permeabilità, nei terreni di media permeabilità, i getti d'acqua ad alta velocità possono costituire il veicolo per l'introduzione e la distribuzione nel terreno contaminato di sostanze (in forma di soluzione o di sospensione) in grado di ridurre o limitare gli effetti della contaminazione.

La combinazione di questi due effetti, l'incremento della conducibilità idraulica e la possibilità di introduzione di un reagente, rende la tecnica dei getti d'acqua ad alta velocità particolarmente adatta agli interventi di bonifica in situ, e specificatamente alla realizzazione di barriere o zone permeabili reattive (PRB) considerate attualmente la tecnica di intervento più competitiva (EPA 2002).

Le PRB, posizionate in modo da intercettare il flusso di contaminante, funzionano come una sorta di grande filtro capace di abbattere la contaminazione. Quest'ultimo aspetto sarà discusso nel seguito della relazione.

3.2 Effetti della pressione e della portata per taglio dei terreni nei getti ad alta energia (Yoshida, et al. 1989)

Lo studio è stato mirato alla ricerca di una maggiore efficienza, e quindi della riduzione dei costi, della tecnica del *jetgrouting*. In particolare l'obiettivo è stato quello della misura della massima profondità di penetrazione raggiungibile con un getto d'acqua ad alta velocità in un terreno, in funzione dei parametri di generazione del getto (pressione, velocità, diametro ugello) e del tempo di permanenza di questo sul materiale.

3.2.1 Equipaggiamento, parametri di esercizio, modalità di esecuzione delle prove

La pompa ad alta pressione utilizzata è il modello HDP 380 che produce una pressione massima di 47 MPa ed una portata di 300 l/min. Il getto è stato fatto agire su un campione sabbioso, di 6 m di lunghezza, 2.2 m di larghezza e 1.8 m di altezza, la cui granulometria e le principali caratteristiche geometriche sono riportate in Tabella 3.1 e in Tabella 3.2

Tabella 3.1 - Granulometria del campione

Distribuzione granulometrica del suolo		
Ghiaia	(%)	6,00
Sabbia	(%)	90,00
Limo + Argilla	(%)	4,00
Dimensione massima grani	(mm)	19,4
Coefficiente di uniformità(U)		2.40
Coefficiente di(U_c)		1.00

Tabella 3.2 - Principali caratteristiche geotecniche

Caratteristiche geotecniche		
Umidità naturale	(%)	22,60
Umidità	(%)	24,00
Massa volumica secca massima	(t/m)	1,50

Per la misura della profondità di penetrazione sono stati posizionati all'interno del campione otto sensori di vibrazione, fissati a degli elementi di una rete di acciaio, che hanno permesso di segnalare il passaggio del getto.

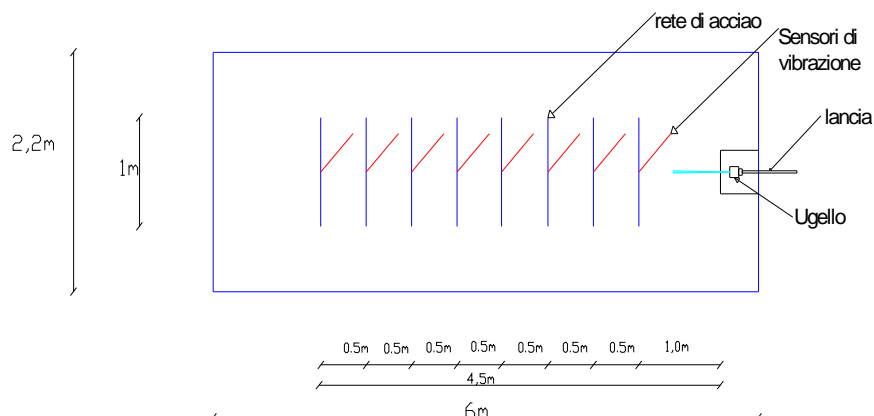


Figura 3.1 - Schema del sistema sperimentale

Il primo dei sensori è stato posizionato ad un metro dall'ugello e gli altri sette sono posizionati ad intervalli di mezzo metro l'uno dall'altro, per una distanza totale di 4,5 metri.

3.2.2 Risultati, valutazioni tecniche ed economiche, conclusioni

La configurazione, utilizzata, ha permesso la misura precisa dei tempi in cui il getto raggiungeva i diversi sensori e la determinazione della velocità di penetrazione e della sua variazione attraverso tutto il campione.

I risultati sono riportati in grafico (Figura 3.2) che rappresenta la profondità raggiunta dal taglio in funzione del tempo di azione del getto.

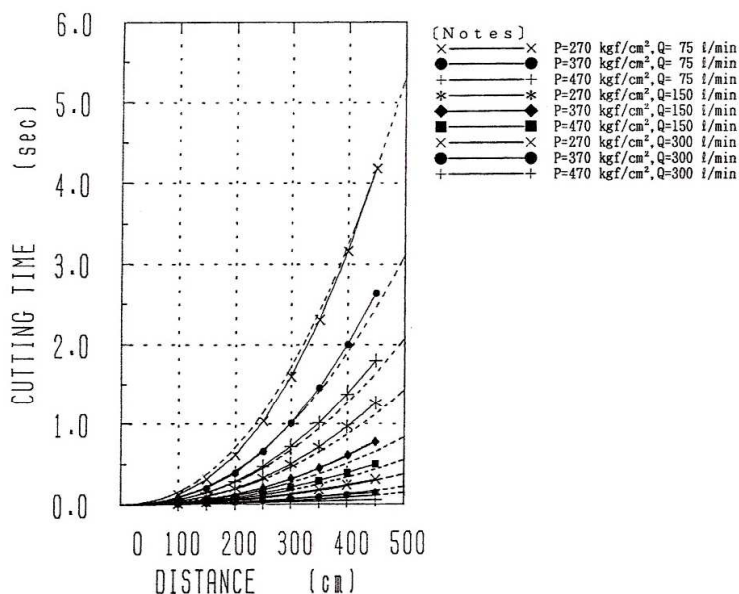


Figura 3.2 - La relazione tra distanza percorsa dal getto e tempo

L'analisi dei dati ha portato alla definizione della relazione:

$$T = 63.700 \times L^{2.21} \times P^{-1.72} \times Q^{-1.88} \quad (3.1)$$

Che lega il tempo di azione (T), alla, distanza penetrata dal getto (L), alla pressione di generazione del getto (P) e a alla portata (Q).

Dalla precedente (2.1) è possibile ricavare anche la velocità di penetrazione del getto, come:

$$V = 1/T \Rightarrow V = 7.10 \times 10^{-6} \times L^{-1.21} \times P^{1.21} \times Q^{1.89} \quad (3.2)$$

Figura 3.3 mostra per tutte le diverse combinazioni di pressione e portata e quindi di potenza idraulica di generazione del getto, la distanza di penetrazione raggiunta dopo un tempo di 0.1 secondi, e quindi a parità di energia spesa.

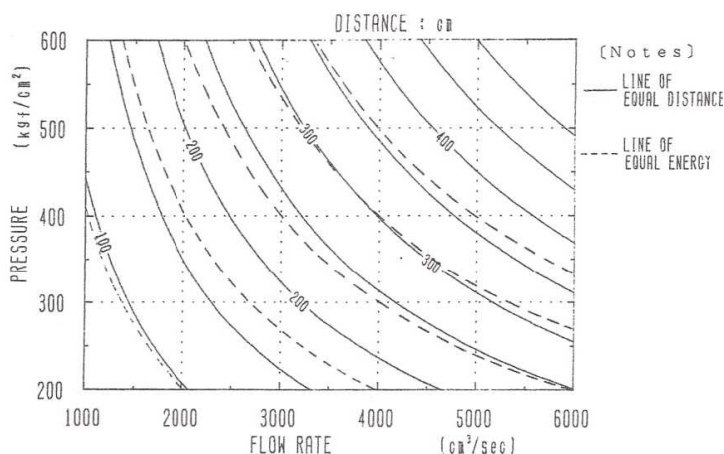


Figura 3.3 - Distanza raggiunta a $t=0.1s$ con le differenti combinazioni di pressione e portata, a parità di energia spesa ($E=(P \times Q)T$)

L'analisi del grafico permette di osservare che gli stessi effetti, in termini di distanza raggiunta a parità di tempo, possono essere ottenuti con gli stessi valori dell'energia impiegata e per diverse combinazioni dei valori di pressione e portata, per esempio:

- $P=60 \text{ MPa}$ $Q=2 \text{ l/sec}$ \Rightarrow $L=225 \text{ cm}$
- $P=20 \text{ MPa}$ $Q=6 \text{ l/sec}$ \Rightarrow $L=250 \text{ cm}$

Un aumento della potenza idraulica immessa ($W=P \times Q$) si ottiene agendo o sulla pressione di generazione o sulla portata ma è da considerare il fatto che un sistema ad altissima pressione richiede una pompa capace di generare tale pressione, tubi e condotte adatti al mantenimento di questa, e componenti meccanici altamente resistenti e quindi in definitiva implica costi elevati.

Un sistema capace di fornire elevati valori di portata è in generale molto più semplice e più economico ed ha minori costi di manutenzione; questo fatto deve far preferire l'uso di sistemi ad alta portata piuttosto che ad alta pressione.

3.2.3 Influenza delle caratteristiche del terreno nell'utilizzo della tecnologia a getti d'acqua (Atmatzidis e Ferrin 1987)

L'efficacia dell'azione del getto, come detto, può essere espressa o in termini di profondità, e quindi volume trattato nel tempo unitario, oppure in termini di energia specifica impiegata per il trattamento di un volume unitario. La sperimentazione di cui si sta scrivendo ha avuto come obiettivo la misura della profondità di taglio, e quindi del volume trattato, in funzione delle principali caratteristiche geotecniche del terreno.

I test sono stati effettuati su quattro tipi di terreno e tutte le prove sono state eseguite con gli stessi parametri operativi. Successivamente, sono state eseguite alcune prove variando, in particolare, la pressione e la velocità di traslazione della lancia.

3.2.3.1 La caratteristiche del terreno che influenzano il getto d'acqua ad alta velocità

La ricerca, come è stato detto, verte sull'analisi dell'influenza dei parametri del terreno sui risultati dell'applicazione della tecnologia dei getti d'acqua. I parametri esaminati sono quelli che meglio rappresentano le interazioni del terreno con agenti perturbanti e che sono:

- Granulometria
- Conducibilità idraulica (k)
- Porosità (n)
- Resistenza a taglio del materiale (σ_t)
- Massa volumica secca (ρ)
- Grado di saturazione (S)

In funzione di questi è stata misurata la profondità massima di penetrazione del getto ed il tempo minimo per cui questa viene raggiunta.

3.2.3.2 Apparato sperimentale e campioni

Le prove sono state eseguite su quattro tipi di campioni differenti ricostruiti e compattati in laboratorio le cui granulometrie sono riportate in Figura 3.4

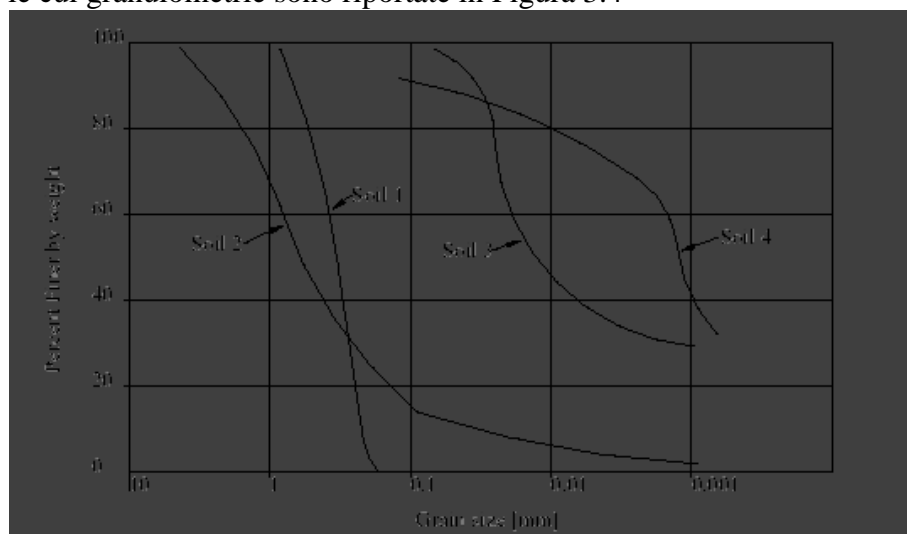


Figura 3.4 - Curve granulometriche dei quattro tipi di campione

I campioni sono:

Soil1: Sabbia “pulita” (Sabbia di Ottawa)

Soil2: 85% in peso sabbia e 15% limo (loess di Vicksburg)

Soil3: Limo (loess di Vicksburg)

Soil4: 85% argilla (di Chicago) e 15% caolino

Il portacampione è stato realizzato secondo i seguenti criteri:

1. pareti impermeabili per il mantenimento del grado di saturazione imposto per la prova;
2. dimensione tale che le pareti non influenzino il comportamento del terreno durante la prova.

3. sufficiente manovrabilità per facilitarne gli spostamenti dalla zona di preparazione a quelle di esecuzione della prove e viceversa.

La compattazione è stata ottenuta con un maglio a caduta azionato manualmente.

Il sistema per la generazione del getto è formato da una pompa a doppio effetto, dotata di intensificatore di pressione, (Petrodyne modello 1780). E le cui caratteristiche sono:

- Portata massima $\Rightarrow 13.5 \text{ l/min (3 gpm)}$
- Pressione massima $\Rightarrow 55 \text{ MPa}$
- Potenza $\Rightarrow 280 \text{ kW}$

L'ugello utilizzato era di carburo di tungsteno, di forma tronco-conica, lungo 1.5 mm e con diametro dell'orifizio di 1.0 mm

La distanza tra ugello e terreno è stata fissata in 150 volte il diametro dell'ugello; tale valore è stato scelto per garantire il massimo effetto¹.

La lancia è stata posta in direzione verticale ed il campione è stato posizionato su una slitta, dotata di movimento verticale a velocità costante e regolabile fino a 25 mm/sec.

3.2.3.3 Le prove

Il numero totale di prove è stato pari a 76, di cui la prima serie mirata alla ricerca del tempo di applicazione ottimale del getto.

Il motivo che ha guidato lo studio di questo parametro è legato al fatto che quando il getto comincia a penetrare nel terreno, apre nuove superfici nel materiale, aumentando così la distanza tra ugello e punto di impatto. Inoltre tale volume viene invaso dal moto turbolento del fango formatosi determinando una forte riduzione della velocità di penetrazione che via via tende ad annullarsi.

Una volta ottenuto il tempo ottimale per l'applicazione del getto (circa 15-20 secondi) e fissata la pressione di esercizio 55 MPa, sono state eseguite tre serie di prove in cui sono state variate le sopracitate caratteristiche del terreno.

La prima serie di prove è stata eseguita variando il grado di saturazione dal 10-15% al 100%; la seconda serie invece è stata condotta variando la massa volumica del campione tra il valore di 1.6 e quello di 2.1, mantenendo costante il contenuto d'acqua. Nella terza serie è stata variata, invece, la velocità di traslazione del campione (fino a 2.5 cm/s), mantenendo invece costanti le caratteristiche del terreno.

3.2.3.4 L'effetto del tempo di applicazione

I campioni in esame sono stati inizialmente preparati con stessa densità secca e con stesso grado di saturazione; successivamente sono stati compattati al fine di ottenere la massa volumica e il grado di saturazione voluto. I valori di massa volumica scelti per i terreni sono, dal tipo 1 al tipo 4, 1.65, 2.1, 1.7 e 1.65 mentre il grado di saturazione è: 50%, 53%, 75% e 62%.

I risultati di questa prima serie di prove sono raccolti nella Figura 3.5 in cui è riportata l'andamento della profondità di penetrazione in funzione del tempo di applicazione.

¹ "Leach, Walker, 1966; Shavlovsky, 1972"

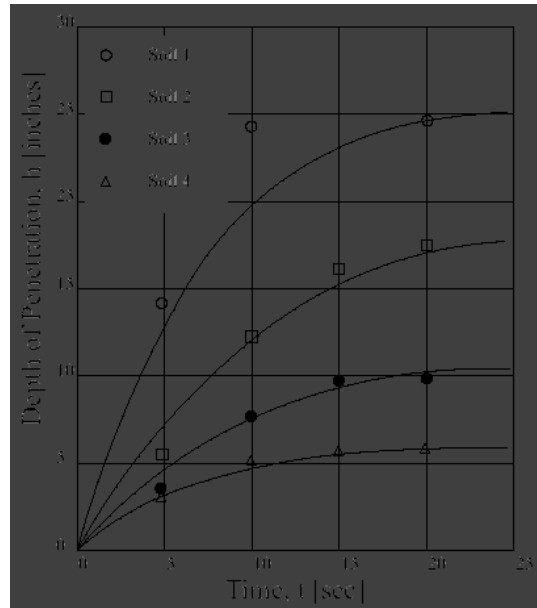


Figura 3.5 – La profondità di penetrazione in funzione del tempo

Dall'analisi del grafico si può dire che, per i quattro tipi di terreno e alla pressione di 70MPa, risulta ottimale, rispetto alla profondità un tempo di penetrazione compreso tra i 10 e i 15 secondi, tale tempo sarà quello utilizzato nelle serie di test seguenti.

La relazione che intercorre tra la profondità di penetrazione (h) e il tempo di applicazione del getto (t), per tutti i tipi di terreno utilizzati nei test, può essere espressa da una legge di tipo esponenziale (4.3), tale risultato trova corrispondenza in studi precedenti come Mellor (1972) e Sundaram e Liu (1978)²:

$$h = h_{\max} (1 - e)^{\frac{t}{\tau}} \quad (3.3)$$

dove h è la penetrazione al tempo t , h_{\max} è la penetrazione massima corrispondente ad un tempo infinito, τ è una costante sperimentale che dipende dalle caratteristiche del getto e dalle proprietà del materiale.

3.2.3.5 L'effetto della velocità di traslazione

Le relazioni, reperibili in letteratura, che legano la velocità di traslazione (V_t) del getto e la profondità di penetrazione (h) e, che come si vedrà, ben si adattando anche alla sperimentazione qui riportata, sono due.

La prima proposta è quella ottenuta da Mellor (1972):

$$h = h_{\max} (1 - e)^{-\frac{v^*}{V_t}} \quad (3.4)$$

dove:

h è la profondità di penetrazione relativa alla velocità trasversale V_t ;

h_{\max} rappresenta la profondità massima corrispondente a una velocità trasversale pari a zero (tempo infinito);

² "Mellor 1972" e "Sundaram e Liu 1978"

V^* : è un costante e dipende dalle proprietà del materiale e del getto.

La seconda relazione, proposta da Sundaram e Liu (1978), che lega la velocità di traslazione alla profondità di penetrazione è:

$$h = h_{\max} (1 - e)^{-\frac{d}{V_i \times \tau}} \quad (3.5)$$

dove:

$$d = \tau V^* \quad (3.6)$$

V^* e τ sono 2 costanti; dipendenti dal tipo di terreno.

d è il diametro della zona influenzata dal getto.

La sperimentazione per la determinazione dei suddetti parametri è stata sviluppata per due fasi successive:

- La prima serie di prove è stata eseguita su tutti e 4 i tipi di terreno, secchi, ed è stata fatta variare la velocità di traslazione del getto fino ad un valore massimo di 2.5 cm/s, ed è stata misurata la profondità di penetrazione, i risultati sono riportati in Figura 3.6.
- La seconda serie di prove, invece, con la stessa modalità, ma solo sul tipo di terreno 1, in cui è stato portato il grado di saturazione a 50% (Figura 3.7).

L'analisi dei risultati mostra che la profondità di penetrazione diminuisce con l'aumentare della velocità di traslazione del getto, e come per altro detto in precedenza, diminuisce anche con al diminuire del tempo di applicazione.

La profondità di penetrazione cresce progressivamente passando dal campione 1 fino al 4, quindi aumenta all'aumentare della dimensione dei grani, inoltre l'osservazione dei campioni trattati permette di constatare il fatto che il getto influenza una volume maggiore rispetto a quello del *foro* che scava.

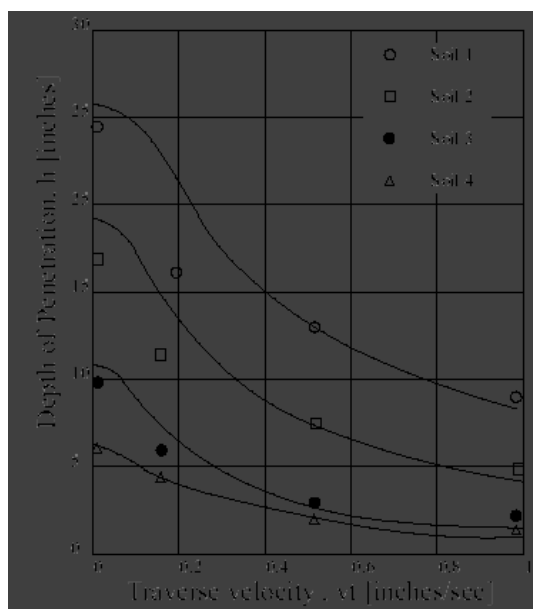


Figura 3.6 – La profondità di penetrazione in funzione della velocità di traslazione per i quattro campioni sotto esame

Per quanto riguarda l'influenza del grado di saturazione, si osserva, che la profondità di penetrazione nella sabbia asciutta è soltanto il 44% rispetto a quello nella sabbia con grado di saturazione 50%, quando il getto è fermo. All'aumentare della velocità trasversale fino ad un valore di 0.8 cm/s la profondità di penetrazione nella sabbia asciutta aumenta fino al valore raggiunto nel campione umido, mentre per velocità maggiori la di variazione della profondità

di penetrazione è molto simile in entrambi i casi le sabbie, sebbene sia sempre maggiore nel campione umido.

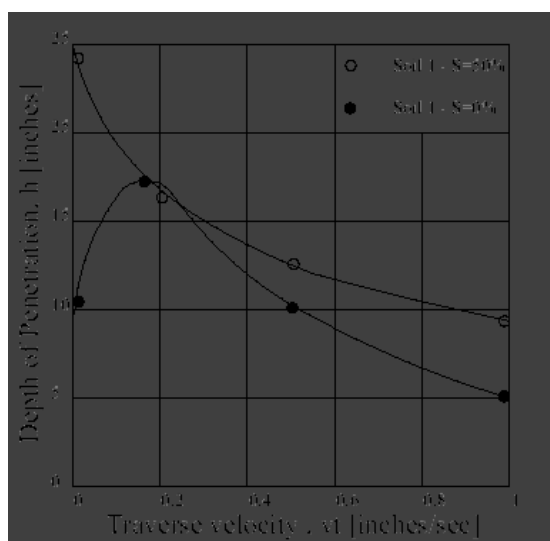


Figura 3.7 – La profondità di penetrazione in funzione della velocità di traslazione per i campione 1 con diversi gradi di saturazione

Questo comportamento può essere spiegato supponendo che, alle basse velocità, il fronte d'acqua avanzi attraverso la sabbia asciutta soprattutto lateralmente, mentre a velocità più alte, il flusso ha una maggiore componente di velocità nella direzione del getto.

3.2.3.6 L'effetto della massa volumica

La relazione intercorrente tra la massa volumica del terreno secco e la profondità di penetrazione è stata studiata eseguendo prove su tutti e 4 le tipologie di terreno, i risultati sono mostrati in Figura 3.8, (l'andamento sarebbe analogo in funzione dell'indice dei vuoti³ o della porosità⁴):

³ “L'indice dei vuoti” rappresenta gli spazi vuoti presenti tra i grani di un terreno ed è definito come il volume dei vuoti rapportato al volume del solido nel terreno,

$$e = \frac{V_{vuoti}}{V_{solido}} [\text{numero puro}] \quad e \in [0; \infty]$$

⁴ “La porosità” è un indice che indica sempre la quantità di acqua che può essere trattenuta in un terreno. In letteratura la porosità è definita come il volume dei vuoti diviso il volume totale del terreno, ossia indica la frazione di volume che i vuoti occupano rispetto al volume totale.:

$$\eta = \frac{V_{vuoti}}{V_{totale}} [\text{numero puro}] \quad \eta \in [0; 1]$$

Esiste una relazione che lega l'indice dei vuoti e la porosità:

$$\eta = \frac{e}{1 + e} \quad \Leftrightarrow \quad e = \frac{\eta}{1 - \eta}$$

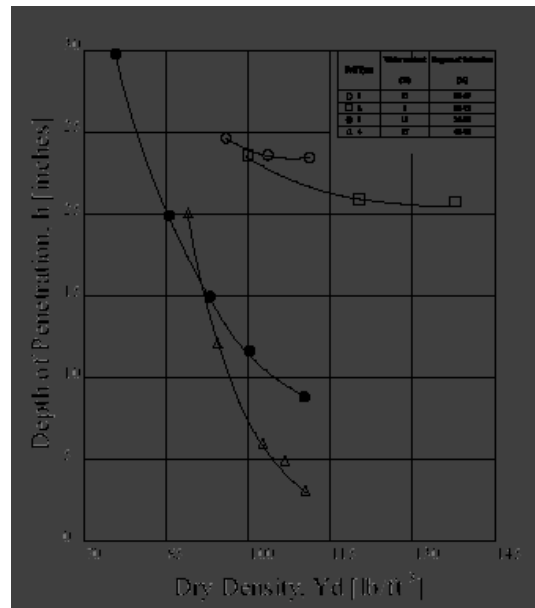


Figura 3.8 – La profondità di penetrazione in funzione della massa volumica secca

L'analisi dei grafici permette di affermare che: la relazione tra profondità di penetrazione e massa volumica secca è fortemente influenzata dal tipo di terreno, e in particolare la variazione di massa volumica influenza molto più la profondità di penetrazione nei terrei con grani di minori dimensioni (curva a maggiore pendenza); e quindi è poco influenzata nelle sabbie, ed invece lo è fortemente in limi e argille.

Le prove sono state eseguite a diversi gradi di saturazione, ma a parità di contenuto d'acqua; perciò è possibile ipotizzare un'influenza di quest'ultimo sulla velocità di penetrazione, come mostrato in seguito nei riguardi della resistenza meccanica.

3.2.3.7 Grado di saturazione⁵

I test sono stati effettuati su tutti e 4 i tipi di terreno, mantenendo costante la massa volumica secca (porosità) e variando solo il grado di saturazione del terreno.

Il risultato, è sempre in termini di profondità di penetrazione è mostrato in Figura 3.9.

⁵ Il "Grado di saturazione" in letteratura è definito come la quantità di acqua presente nel terreno, e viene calcolato come il volume dell'acqua presente nel terreno diviso il volume dei vuoti del terreno.

$$S = \frac{V_{Acqua}}{V_{vuoti}} \quad S \in [0;1]$$

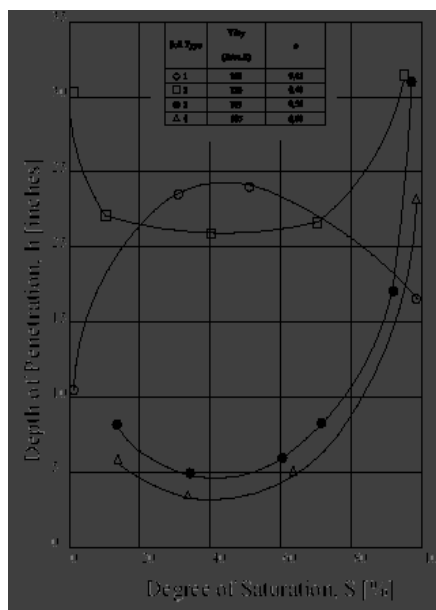


Figura 3.9 – La profondità di penetrazione in funzione della grado di saturazione

L'analisi del grafico permette di affermare che la variazione della profondità di penetrazione rispetto al grado di saturazione segue andamenti notevolmente differenti a seconda del tipo di terreno; è possibile notare che la profondità di penetrazione è maggiore nei terreni 3 e 4, più coesivi con grani più fini (limo e argilla) rispetto ai terreni 1 e 2, che sono costituiti da grani più grossi (sabbia).

La curva relativa al terreno 1 è convessa, ed ha quindi, un andamento molto differente da quello degli altri tre terreni, per cui la funzione che lega profondità di penetrazione a grado di saturazione relazione è concava.

I risultarti possono essere così sintetizzati:

- nel terreno 1, sabbia, la profondità di penetrazione massima è stata ottenuta con un grado di saturazione pari a circa il 50%.; mentre questa decresce, sia all'aumentare sia al diminuire di questo, portandosi sui valori minimi sia per condizioni secche e che completamente sature.
- Per gli altri tre materiali invece la penetrazione massima è stata ottenuta per alti gradi di saturazione (circa 95%), mentre la minima è stata ottenuta per gradi di saturazione pari a circa il 40-50%; ulteriori riduzioni del grado di saturazione hanno invece provocato un nuovo aumento della profondità di penetrazione.

3.2.3.8 La conducibilità idraulica⁶

La conducibilità idraulica di un terreno dipende dalle caratteristiche sia del fluido che lo permea sia dalle caratteristiche di terreno, e cioè dalle dimensione delle particelle, dall'indice dei vuoti, della composizione, della tessitura e del grado di saturazione del terreno⁷.

La letteratura riporta numerose relazioni che legano i parametri suddetti, in particolare l'indice dei vuoti⁸, alla conducibilità idraulica. In questo studio è stato scelto di riportare i risultati di penetrazione del getto in funzione del quadrato della conducibilità idraulica (Figura 3.10).

Dall'analisi dei risultati è possibile fare le seguenti osservazioni:

- La relazione tra quadrato dell'indice dei vuoti e profondità di penetrazione è lineare per tutti e quattro differenti tipi di terreno ;
- La profondità di penetrazione aumenta passando dal terreno 4 (argilla) al terreno 1 (sabbia); questo indica che all'aumentare della dimensione dei grani, e quindi della conducibilità idraulica aumenta la profondità di penetrazione.

⁶ La "permeabilità" indica la quantità di acqua che può attraversare un terreno nell'unità di tempo. Essa dipende in parte dalle caratteristiche del terreno e in parte da quelle del fluido. Un indice della permeabilità di un terreno è la *conducibilità idraulica* (K), detto anche coefficiente di permeabilità, ed è definito come:

$$K = k \frac{\rho g}{\eta} \left[\frac{\text{lunghezza}}{\text{tempo}} \right]$$

Dove i parametri ρ (densità o massa volumica), η (viscosità dinamica) e g (forza di gravità) rappresentano le caratteristiche del fluido. Il parametro k è definito *Permeabilità intrinseca*, d è una caratteristica del terreno ...La relazione che lega la conducibilità idraulica alla granulometria di un terreno è la seguente

$$k = C d_e^2 \left[\text{lunghezza}^2 \right]$$

Dove C è una costante dimensionale dipendente dalla disposizione, granulometria e forma dei grani e dalla porosità del terreno, d_e è il diametro efficace dei grani del terreno (rappresenta il diametro del setaccio a cui corrisponde il 10% del terreno passato in fase di vagliatura)

⁷ "Lambe e Whitman" (1969)

⁸ Tra la conducibilità idraulica e l'indice dei vuoti esistono relazioni sperimentali di diversi autori:

$$K = \frac{e^3}{1+e}$$

Oppure

$$K = \frac{e^2}{1+e^2}$$

Oppure

$$K = \frac{e^2}{1+e}$$

Inoltre alcuni autori come Lambe e Whitman (1969) suppongono possa essere lineare.

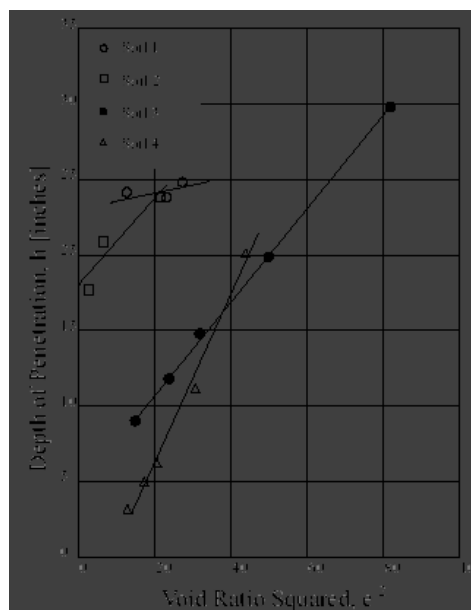


Figura 3.10 - Profondità di penetrazione in funzione della del quadrato dell'indice dei vuoti

3.2.3.9 L'influenza della resistenza a compressione monoassiale

L'influenza della resistenza a compressione monoassiale del materiale nei confronti della profondità di penetrazione è nota (Cooley, 1974), ed è riprovata dai test qui riportati. I terreni più coesivi, 3 e 4 (limi ed argille), che possiedono un'alta resistenza a compressione, risultano più difficilmente penetrabili, del terreno 2 (85% sabbia e 15% limo), il quale ha una coesione bassa e del terreno 1 (sabbia) che non possiede coesione.

Per studiare tale effetto è importante ricostruire e caratterizzare i campioni dal punto di vista meccanico, nelle stesse condizioni di addensamento e quindi tensionali, che poi saranno utilizzate nelle prove col getto d'acqua (Lambe e Whitman, 1969), questo risulta ancor più importante quando questi non sono completamente saturi e quindi ci si trovi in condizioni di non applicabilità del principio delle tensioni efficaci⁹.

I risultati delle misure profondità di penetrazione in relazione alla resistenza a compressione monoassiale possono essere così riassunti:

La profondità di penetrazione nel terreno 1 (sabbia di Ottawa), che deve la sua resistenza puramente all'attrito inter-granulare, e non al suo grado di addensamento e di saturazione, non è quindi influenzata dalla resistenza meccanica.

Il terreno 2 (sabbia-limo) possiede una piccola coesione, all'aumentare del grado di addensamento e della saturazione è stato misurato un aumento della resistenza e una

⁹ Il "principio delle tensioni efficaci" (Terzaghi 1923): Lo sforzo totale (σ_{tot}) di un terreno è dato dalla somma di due componenti di sforzo, gli sforzi efficaci (σ') e la pressione idrostatica (u). Il principio delle tensioni efficaci regola gli stati tensionali in un terreno (mezzo discontinuo) anche se in esso sono presenti tutte le tre fasi della materia (solido, liquido e gas). Di conseguenza la superficie contatto, dove vengono applicate le forze, è composta dallo scheletro solido dei grani e dagli interstizi intergranulari dove sono presenti acqua e gas (anche se quest'ultimo viene trascurato per la difficoltà nella determinazione degli sforzi agenti su esso).

La forza agente che crea gli stati tensionali sarà quindi ripartita sulla parte solida, che viene caricata dalle forze esterne f_i , e sulla parte liquida che è rappresentata dalle forze idrostatiche (o neutre)

$$\sigma_{tot} = \frac{\sum f_i}{A_{totale}} + u \frac{(A_{totale} - A_{Grani})}{A_{totale}} = \sigma' + u \rightarrow A_{grani} \cong 10^{-3} A_{totale} \Leftrightarrow A_{grani} \text{ è trascurabile}$$

Per via di quest'ultimo passaggio la motivazione per cui sia difficile applicare tale teorema a terreni parzialmente saturi, mentre descrive perfettamente le condizioni di saturazione o secche.

diminuzione della permeabilità, e una relativa diminuzione nella profondità di penetrazione del getto.

Per i terreni 3 e 4, invece, è stato misurato un forte aumento della resistenza all'aumentare del grado di addensamento che determina la riduzione della profondità di penetrazione rispetto alle prove precedenti. Il rapporto fra profondità di penetrazione e resistenza a compressione monoassiale è di tipo non lineare. La più piccola profondità di penetrazione è stata ottenuta in corrispondenza della maggiore resistenza (maggiore massa volumica e grado di saturazione compreso tra 30% e 60%).

La difficoltà interpretativa di questi risultati è legata al fatto che all'incremento della resistenza sia associata la riduzione della conducibilità idraulica e quindi non è chiaro se la variazione della profondità di penetrazione sia da attribuire all'aumento di resistenza o piuttosto alla riduzione di permeabilità.

3.2.3.10 Conclusioni

I risultati mostrati e discussi in precedenza possono essere sintetizzati nei seguenti punti.

1. Il tempo richiesto perché il getto raggiunga la massima penetrazione nel terreno è dell'ordine dei dieci secondi ed è minore nei materiali granulari non coesivi; la relazione tra profondità della penetrazione e tempo di applicazione è di tipo esponenziale.
2. Il legame tra profondità della penetrazione e velocità trasversale del getto è anch'essa di tipo esponenziale e all'aumentare della velocità d'avanzamento diminuisce il volume d'influenza.
3. Il volume di terreno influenzato dall'azione del getto d'acqua è comunque molto maggiore del foro scavato; questa "zona di influenza" (zona permeata dall'acqua sotto l'azione del getto) aumenta all'aumentare della dimensione dei grani del terreno.
4. La maggiore massa volumica, a parità di contenuto d'acqua, provoca una diminuzione nella profondità di penetrazione del getto; ciò può essere attribuito al corrispondente aumento di resistenza e/o alla diminuzione della permeabilità del terreno, tale effetto è trascurabile per le sabbie, ma è molto pronunciato per i terreni fini.
5. Il grado di saturazione influenza la profondità di penetrazione del getto nel terreno; se questo ha granulometrie inferiori a quelle di una sabbia la profondità di penetrazione massima si realizza per la saturazione completa, mentre la minima si ha per un grado di saturazione pari a circa 40-50%.
6. La profondità di penetrazione aumenta linearmente all'aumentare della conducibilità idraulica del terreno.
7. La maggiore resistenza a compressione monoassiale determina una diminuzione della profondità di penetrazione.

4 Lo studio della velocità di penetrazione e delle deformazioni indotte su un terreno dal getto d'acqua fermo o in movimento traslatorio

4.1 Introduzione

Lo studio sviluppato in questa fase ha avuto l'obiettivo di determinare la velocità di penetrazione di un getto d'acqua continuo in un mezzo granulare ed il campo degli spostamenti e delle velocità delle particelle di terreno.

Il problema principale legato a questo tipo di misura e di analisi è l'estrema velocità con cui il fenomeno si sviluppa che è stato risolto utilizzando una tecnica basata sulla ripresa video ad alta velocità.

La sperimentazione è stata eseguita realizzando un porta campione costituito da due lastre di cristallo disposte parallele ed a piccola distanza l'una dall'altra in modo da contenere fra le due un sottile strato di terreno. La trasparenza del contenitore consente la video ripresa del fenomeno che viene poi elaborata attraverso la tecnica del *Particle Image Velocimetry* (PIV) (Raffel e Willert C. 1998), attraverso la quale è ottenuta la misura degli spostamenti dei grani nel tempo e la misura della velocità di penetrazione del getto d'acqua nel campione di terreno. La sperimentazione è stata condotta nel laboratorio del Dipartimento di Geingegneria e Tecnologie Ambientali (DIGITA) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari.

4.2 L'apparato sperimentale

Il sistema *waterjet* impiegato per le prove sperimentali è del tipo a getti continui. La lancia è notata in direzione verticale su un telaio metallico, che sostiene anche il sistema portacampione. Sulla stessa struttura è sistemato un sistema pneumatico per la costituzione del campione mediante compattazione statica. Il fenomeno è osservabile attraverso una superficie in cristallo, che permette la video ripresa della prova.

L'apparato sperimentale è dunque costituito da:

- il porta campione
- il sistema di compattazione del terreno
- la pompa di generazione dei getti ad alta pressione;
- la lancia con testa porta ugello;
- l'otturatore del getto e relativo trigger;
- il sistema di acquisizione delle immagini;
- l'impianto di illuminazione;
- il software per l'analisi delle immagini (*geoPIV8*)

L'apparato è integrato da un meccanismo che fornisce il movimento traslatorio alla lancia ed alla testa porta ugello e che permette studiare l'effetto della traslazione della lancia.

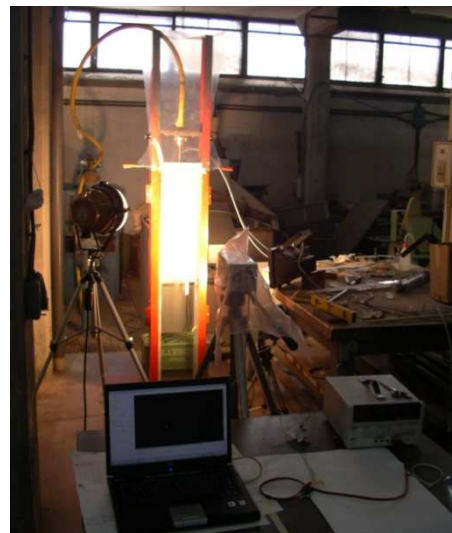


Figura 4.1 - L'apparato sperimentale

Nel seguito vengono descritte in dettaglio le singole parti.

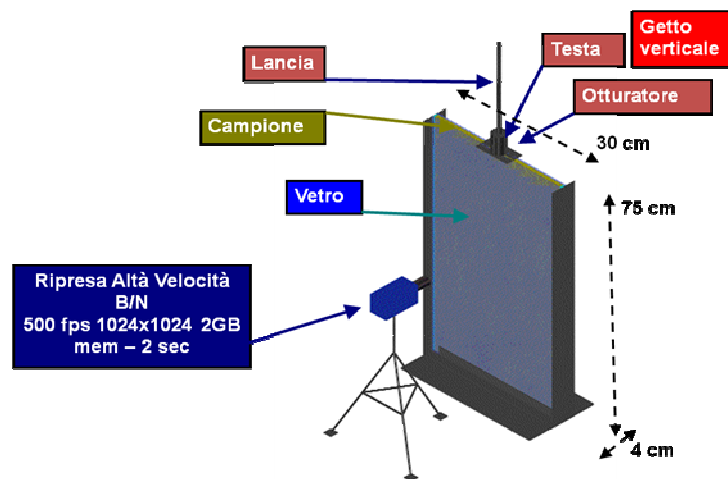


Figura 4.2 - Schema dell'apparato sperimentale utilizzato.

4.2.1 Il portacampione

Il portacampione (Figura 4.3 e Figura 4.4) è costituito da una intelaiatura metallica che ha la funzione di sostenere un piano di cristallo ed uno di legno, fra i quali viene disposto il campione. Lo stesso telaio sostiene, nelle rispettive fasi, sia il sistema di compattazione sia la lancia *waterjet*. Esso è formato da una piastra orizzontale di base di circa 1 m² di superficie e da due sostegni verticali di altezza 230 cm e 10 cm di profondità. Il cristallo (altezza 150 cm, larghezza 40 cm, spessore 1 cm) posizionato tra i due sostegni ha la funzione di rendere visibile dall'esterno l'azione del getto sul campione. Il campione viene realizzato tra il vetro ed un pannello di legno e può avere un'altezza di 75 cm, una larghezza di 40 cm, ed uno spessore massimo di 4 cm.

Il portacampione è dotato di una piastra mobile superiore, fissata tra i sostegni verticali, in cui è possibile bloccare sia il sistema di compattazione (Figura 4.3) sia la lancia *waterjet* (Figura 4.4). Tramite un apposito sistema di centratura triassiale è possibile ottenere una perfetta verticalità, sia del sistema di centratura, sia della lancia *waterjet*. Inoltre, è possibile regolare sia l'altezza della lancia rispetto al campione sia la sua distanza dal vetro. Questi sistemi consentono la regolazione della posizione della lancia in modo che la penetrazione del getto non sia troppo influenzata dall'interfaccia vetro-terreno e che, d'altra parte, venga ripreso quello che avviene il più possibile vicino all'asse del getto.

Il portacampione è forato sul fondo in modo da permettere la fuoriuscita dell'acqua quando viene attraversato dal getto.

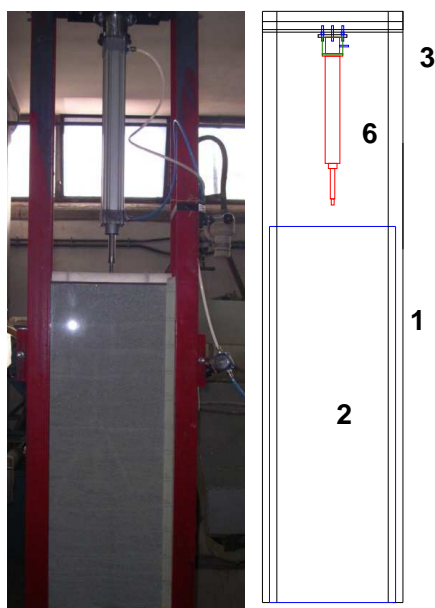


Figura 4.3 – Il portacampione in configurazione di preparazione con il sistema di compattazione

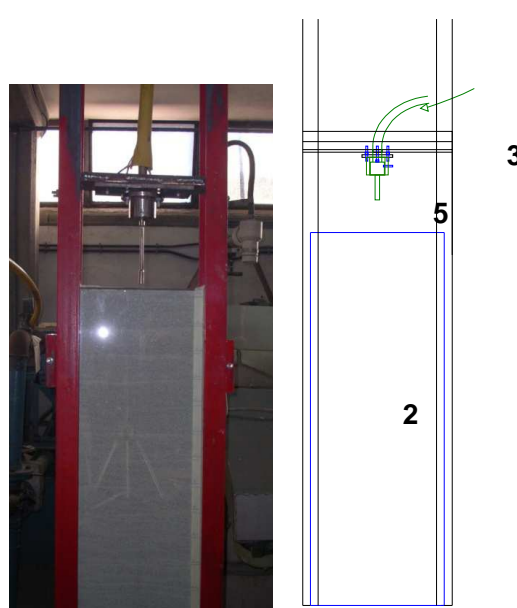


Figura 4.4 – Il portacampione in configurazione di prova con la lancia del getto d'acqua

1-intelaiatura metallica
2-vetri
3-piastra mobile
4-sistema di centratura

5-lancia *waterjet*
6-pistone pneumatico

4.2.2 Il sistema di compattazione

Il sistema di compattazione è costituito da un pistone pneumatico (diametro interno $\phi = 4.0$ cm e lunghezza dello stelo $l = 35$ cm) che può applicare pressioni fino a 0,15 MPa e da una piastra di spinta avente area pari a quella superiore del campione; Il pistone è azionato da un compressore d'aria capace di produrre una pressione $P_{comp} = 0,1$ MPa, attraverso un regolatore di pressione e una valvola a tre vie.

Il campione viene costituito per 12 strati, ognuno di 1 kg di peso e di circa 7 cm di altezza. Lo spessore di ciascuno strato viene ridotto di circa il 10% in fase di compattazione.

La scelta di utilizzare un tale sistema è stata guidata dall'esigenza di controllare le condizioni di prova per tutta la campagna sperimentale, così da garantire la ripetibilità dei risultati.

Una volta scelta la pressione di compattazione, nota la geometria del portacampione e misurati gli abbassamenti generati dall'applicazione di tale pressione, è stato possibile determinare la densità del campione.

Le dimensioni del pistone e del campione sono

$$d_p = 4,0\text{cm} \Rightarrow \text{Diametro del pistone}$$

$$A_p = 12,56\text{cm}^2 \Rightarrow \text{Area di spinta del pistone}$$

$$L = 27,0\text{cm} \Rightarrow \text{Lunghezza campione}$$

$$B = 4,0\text{cm} \Rightarrow \text{Larghezza campione}$$

$$H = 71,5\text{cm} \Rightarrow \text{Altezza campione}$$

$$V = 7722,0\text{cm}^3 \Rightarrow \text{Volume campione}$$

$$A_c = 108,0 \text{ cm}^2 \Rightarrow \text{Area superiore campione}$$

La pressione di compattazione (P_{comp}) è stata scelta pari a 0,1 MPa.

La massa (m) totale del campione è pari a 11,5-12 kg; la densità risultante dalla compattazione (ρ) è pari a quindi 14,7-14,8 kN/m³.

Nella figura seguente sono illustrate alcune fasi della procedura di compattazione.



Figura 4.5 - Alcune immagini della fase di compattazione del terreno. (a) compattazione strato numero 1; (b) compattazione strato numero 6; (c) compattazione strato numero 12

4.2.3 Il sistema di generazione dell'alta pressione

Il sistema di pressurizzazione utilizzato per la sperimentazione è la una pompa a tre pistoni Hammelmann HDP 334, capace di produrre una pressione massima di 250 MPa, azionata da un motore diesel Caterpillar CAT 3406B da 354 kW, completamente incapsulata all'interno di una struttura insonorizzante (Figura 4.6).

I parametri caratteristici della pompa sono:

- Portata massima erogabile: 54 l/min
- Pressione massima: 250 MPa
- Potenza motrice: 280 kW
- Velocità rotazione albero: fino a 2000 giri/min
- Peso: 1,2 t

La pressione desiderata viene impostata regolando il numero di giri del motore diesel.

Un inconveniente di questa tipologia di pompa è che la pressione prodotta non è perfettamente stazionaria ma varia in un piccolo campo attorno al valore nominale; tale variazione è da attribuire alle fluttuazioni della potenza generata dal motore diesel.

Un altro inconveniente è rappresentato dal fatto che la pompa, nel momento della sua accensione, non genera immediatamente la pressione di esercizio a cui arriva progressivamente.



Figura 4.6 - Pompa per alta pressione Hammelmann

Tale inconveniente, come sarà discusso in seguito è stato risolto posizionando un sistema di otturazione tra lancia e campione.

L'acqua in pressione viene condotta alla lancia da tubazioni per alta pressione.

4.2.4 La lancia *waterjet* e l'ugello

La lancia *waterjet* è lunga 20 cm circa e contiene alla sua estremità (testa) l'ugello in zaffiro che può avere diametro da 0,5 mm a 2 mm.

Il coefficiente di contrazione di questa tipologia di ugelli è di 0.63.

La lancia è fissata all'intelaiatura metallica dalla piastra mobile, che posizionata e fissata in posizione di prova, ne impedisce qualsiasi movimento durante la prova, ma ne permette il preciso posizionamento orizzontale e verticale (stand-off distance). La posizione orizzontale è tale da determinare una distanza di 7.5 mm dal bordo interno del vetro che contiene il campione. La posizione verticale è stata fissata in 1 cm. La scelta è stata vincolata dall'ingombro del sistema di otturazione descritto di seguito.

Nel caso delle prove con la lancia in movimento traslatorio la lancia viene montata su un braccio di supporto montato su una slitta mossa da un motore elettrico a velocità regolabile.

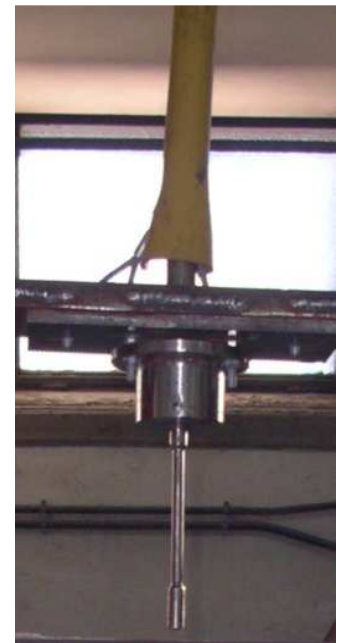


Figura 4.7 - La lancia *waterjet*

4.2.5 Sistema di otturazione del getto

L'apparato sperimentale è dotato di un sistema di otturazione che interrompe l'azione del getto sul campione (Figura 4.8). Il sistema è formato da una piastra rettangolare in acciaio inossidabile (27 cm di lunghezza, 8 cm in larghezza e 0.5 cm di spessore) fissata alla superficie superiore del campione che ha la funzione di sigillarlo impedendo la fuoriuscita di materiale durante la prova. Sulla piastra di chiusura è presente un foro ($\phi = 3$ cm) esattamente al di sotto dell'ugello che permette al getto di agire sul campione.

Una seconda piastra di dimensioni più piccole (3 cm x 5 cm), mossa da un piccolo pistone pneumatico (superficie di spinta di 3.14 cm²) e comandato da una valvola a tre vie, permette l'apertura e la chiusura del foro. La piastrina viene sovrapposta al foro e tenuta ferma dal pistone nella fase di crescita della pressione, in modo che non vengano alterate le condizioni iniziali del campione. La piastrina viene poi sfilata velocemente quando la pressione raggiunge il valore di regime ed ha inizio la prova.

La velocità di apertura del foro risulta di fondamentale importanza, poiché da essa dipendono le deviazioni del getto dovute all'impatto di questo sul bordo della piastrina durante il movimento di apertura.

Al sistema di otturazione è collegata anche un telo di plastica che impedisce all'acqua di raggiungere e scorrere sul vetro e disturbare la video ripresa della prova.



Figura 4.8 - Il sistema di otturazione del getto a sinistra chiuso e a destra aperto

4.2.6 Sistema di acquisizione delle immagini

Il sistema di acquisizione delle immagini è costituito da una telecamera da alta velocità di acquisizione, pilotata da un software e quindi da un computer. La necessità di utilizzare uno strumento di questo genere è dettata dall'estrema velocità in cui si sviluppa il fenomeno oggetto dello studio.



Figura 4.9 - La telecamera ad alta velocità

La telecamera è la MemView2GB della SouthernVision Inc. (Figura 4.9) ed è capace di acquisire immagini in bianco e nero con una frequenza di 500 fps, alla sua risoluzione massima pari a 1280x1024 pixel. Il tempo di registrazione massimo è 2 secondi.

La telecamera ha la proprietà anche di registrare periodi più lunghi a risoluzioni più basse e/o a frequenze più basse, le possibili combinazioni sono mostrate in Tabella 4.1.

Tabella 4.1- Risoluzione, tempo di esposizione e frequenza di acquisizione

Frame Size (pixels)	Exposure	Frame Rate
1280 x 1024	2μsec-2,05μsec ~2μsec	488fps 1/1 _{exp}
1280 x 960	2μsec-1,92μsec ~2μsec	520fps 1/1 _{exp}
1280 x 512	2μsec-1,02μsec ~1μsec	976fps 1/1 _{exp}
640 x 512	2μsec-1,02μsec ~1μsec	976fps 1/1 _{exp}
640 x 480	2μsec-963μsec ~1μsec	1038fps 1/1 _{exp}
1280 x 256	2μsec-512μsec ~500μsec	1953fps 1/1 _{exp}
320 x 256	2μsec-512μsec ~500μsec	1953fps 1/1 _{exp}
160 x 128	2μsec-256μsec ~250μsec	3906fps 1/1 _{exp}
1280 x 128	2μsec-256μsec ~250μsec	3906fps 1/1 _{exp}
720 x 480	2μsec-0,96μsec ~250μsec	1038fps 1/1 _{exp}
1280 x 32	2μsec-64μsec ~250μsec	15,625fps 1/1 _{exp}

La telecamera acquisisce le immagini nella sua memoria (RAM) interna che ha dimensione 2 GB e solo successivamente le trasferisce ad un computer ad essa collegato.

Il limite di questo tipo di apparecchiatura è proprio la memoria. Poiché, infatti, esiste un limite alla velocità di trasferimento delle informazioni, non è possibile trasferire in tempo reale le immagini riprese dalla telecamera ad una memoria di massa tipo quella di un disco rigido di un computer. Le immagini vengono dunque registrate su una memoria RAM la cui dimensione è limitata per cui l'elevata risoluzione limita il tempo totale di acquisizione (il numero totale di immagini acquisite) e la risoluzione spaziale delle immagini (maggiore è la risoluzione delle immagini, maggiore sarà l'occupazione di memoria).

L'alta frequenza di acquisizione, pone inoltre un limite, che non dipende dalla tecnologia, al tempo di esposizione che può essere al massimo pari all'inverso della frequenza stessa. Questo fatto rende necessaria una potente illuminazione ausiliaria per evitare la sottoesposizione delle immagini.

4.2.7 Il sistema di sincronizzazione (*trigger*)

L'azione del getto d'acqua si sviluppa in tempi molto piccoli ed inferiori al secondo; l'uso della telecamera ad alta velocità limita il tempo massimo di prova a pochi secondi. Risulta quindi di fondamentale importanza l'utilizzo di un sistema di sincronizzazione tra l'apertura del sistema di otturazione del getto e l'inizio della registrazione.

Il sistema di sincronizzazione o trigger, è realizzato mediante in un circuito elettrico alimentato a 3 - 5 Volt, da un generatore di corrente continua, al cui interno è posto un microinterruttore. Quest'ultimo è azionato dalla piastrina dell'otturatore e un impulso TTL che determina la partenza della registrazione video.

La telecamera acquisisce in continuo, ma inizia la memorizzazione delle immagini solo se riceve l'impulso di trigger.

4.2.8 Il software di comando della telecamera MEMVIEW

La telecamera può essere impostata solo attraverso un software per computer, che permette di visualizzare l'immagine in tempo reale rendendo possibile sia le comuni operazioni di ripresa come l'inquadratura della zona da riprendere e la messa a fuoco, sia l'impostazione dei parametri tipici della ripresa ad alta velocità, quali:

Frequenza di acquisizione: es 500 fps
 Dimensione delle immagini: es 1280x1024 pixel
 Tempo di esposizione: es. 0.5 msec (è al massimo pari all'inverso della frequenza di acquisizione)
 Durata della registrazione: es: 2 sec
 Numero totale di immagini: es: 1000 (è pari al prodotto della frequenza per la durata di registrazione)

La durata della registrazione dipende dalla dimensione delle singole immagini e dalla memoria totale disponibile sulla telecamera.

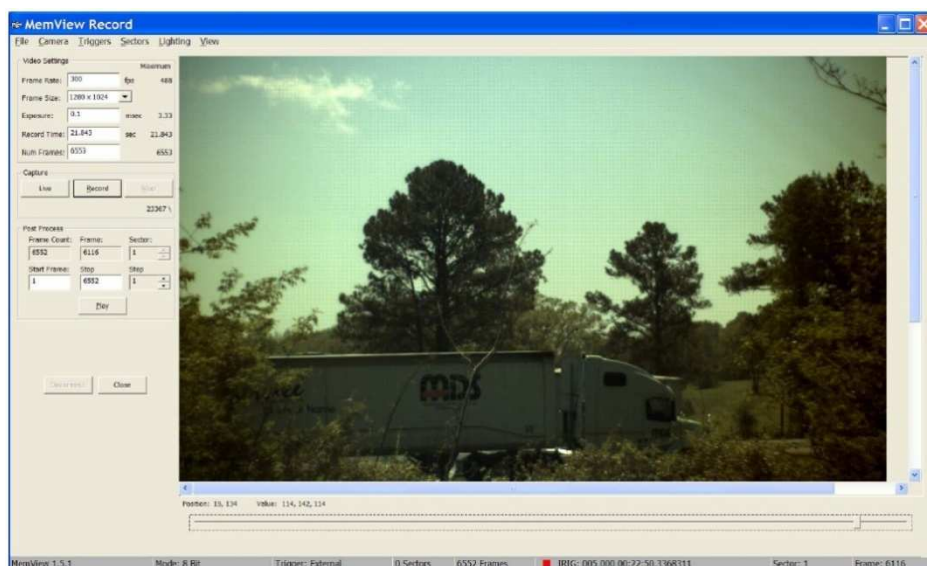


Figura 4.10- Schermata principale del software MEMVIEW

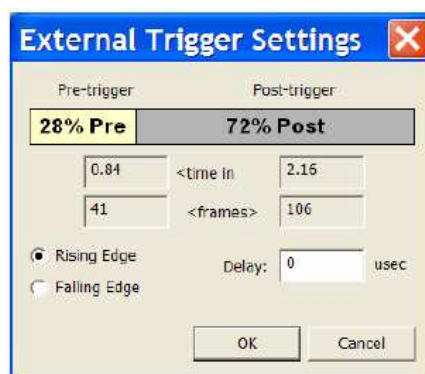


Figura 4.11 - Schermata impostazione trigger MEMVIEW

Il software permette inoltre l'impostazione del trigger. Come detto in precedenza la telecamera acquisisce le immagini in continuo ma inizia la memorizzazione solo nell'istante in cui viene raggiunta dall'impulso di trigger. Il software consente però di anticipare o

posticipare la partenza della registrazione, distribuendo il tempo totale di ripresa in parte prima (pre-trigger) e in parte dopo (post-trigger) (Figura 4.11) l'impulso di trigger.

4.2.9 Il sistema di illuminazione

La ripresa con telecamera, viste le limitazioni sul tempo di esposizione (vedi 4.2.6), necessita di una adeguata illuminazione perché le immagini abbiano una qualità sufficiente alla successiva elaborazione. L'apparato sperimentale è perciò completato da due fari, con lampade del tipo ad incandescenza, rispettivamente da 2 kW e da 1 kW.

4.2.10 Il sistema di movimento

Con una seconda serie di test è stato affrontato lo studio dell'influenza della velocità di movimento traslatorio in direzione ortogonale al getto, sulla velocità di penetrazione dello stesso. La lancia è stata montata su un braccio di supporto collegato a un sistema di movimento a slitta mosso da un motore elettrico (Figura 4.12).



Figura 4.12 - Il sistema di movimento

4.3 Il materiale

Il campione di terreno granulare scelto per la sperimentazione è ottenuto attraverso la vagliatura a secco di una sabbia quarzosa la cui granulometria è riportata in Figura 4.13, e i cui diametri delle particelle sono compresi tra 1 mm e 2 mm.

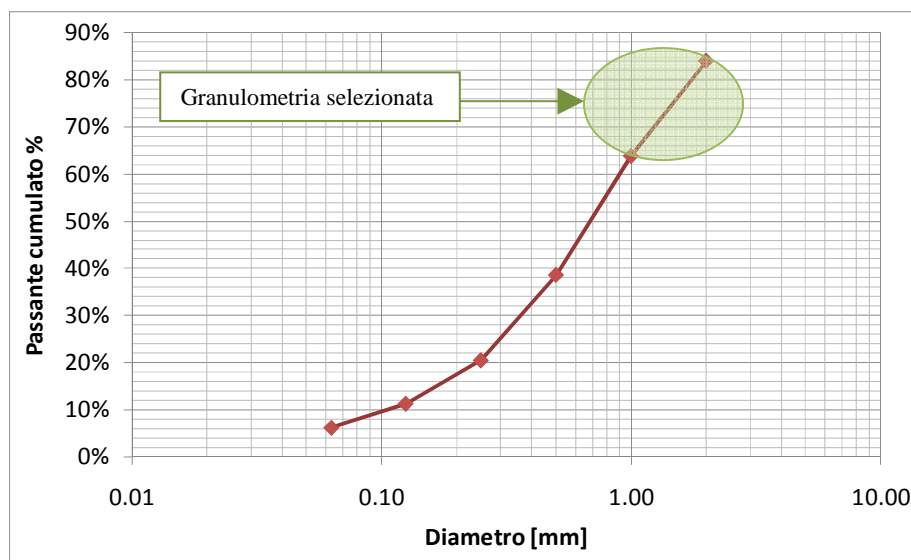


Figura 4.13 - Curva granulometrica della sabbia per i campioni

La scelta della granulometria del materiale è stata determinata dall'esigenza di avere grani sufficientemente grandi, e quindi visibili, da consentire una facile analisi delle immagini riprese dalla video camera.

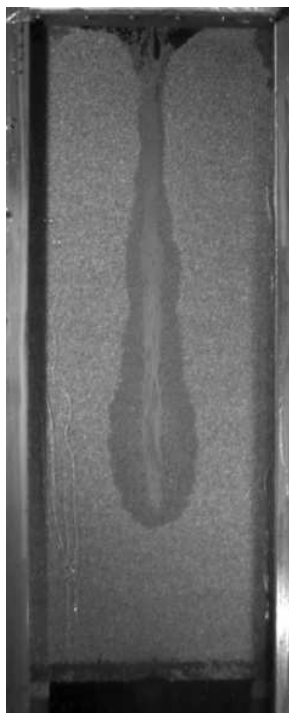


Figura 4.14 - Immagine acquisita durante una prova su un campione secco

Prima del test, il campione viene saturato con un volume d'acqua di 4 litri in modo che il suo colore diventi uniforme e la misura della velocità delle particelle, attraverso l'analisi dell'immagine, non venga inficiata dalla presenza di flussi d'acqua sulla superficie del campione. Si può osservare infatti, nella Figura 4.14, relativa a una prova eseguita su un campione secco, la presenza di due zone distinte: quella centrale è la traccia del getto d'acqua vero e proprio; la zona più esterna è una zona di permeazione lenta dell'acqua inserita dal getto. La presenza di questa seconda zona impedisce una corretta analisi delle velocità per i motivi che saranno chiariti nel seguito.

Il contenuto d'acqua finale a cui viene eseguita la prova, è pari a circa il 5-7 %, poiché, essendo il materiale estremamente permeabile e il fondo del campione forato, l'acqua trattenuta dal campione risulta solo una frazione di quella globalmente introdotta.

4.4 La procedura di prova

La sequenza operativa utilizzata per tutta la campagna di prove è la seguente:

- Inserimento del terreno nel portacampione: il terreno viene inserito e compattato in 12 strati da 1 kg, che equivalgono a circa 7 cm di altezza ciascuno, in modo da permettere una compattazione uniforme in tutto il suo volume (vedi 4.2.2)
- Posizionamento del sistema di chiusura e di otturazione (vedi 4.2.5).
- Posizionamento e centraggio della lancia *waterjet*.
- Posizionamento della telecamera ad alta velocità (vedi 4.2.6).
- Sistemazione dell'impianto di illuminazione (vedi 4.2.9).
- Esecuzione della prova:
 - azionamento della pompa per la generazione del getto;
 - apertura del sistema di otturazione nell'istante in cui la pressione raggiunge il valore di esercizio;
 - avvia della video-registrazione da parte del trigger collegato all'otturatore.

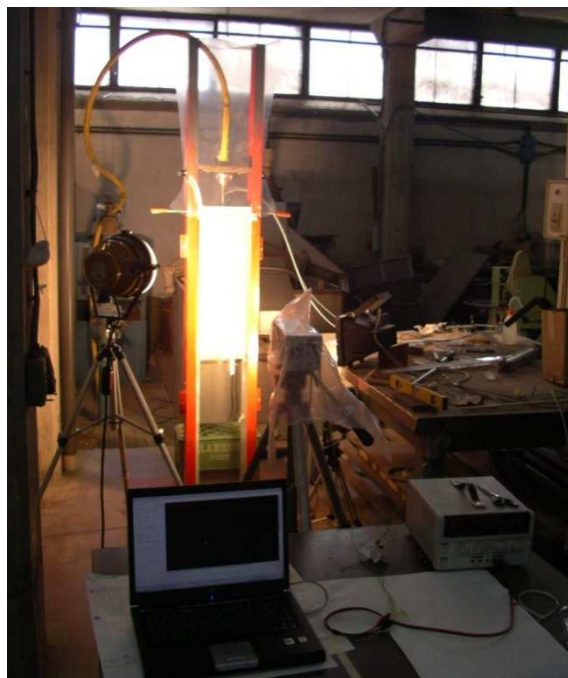


Figura 4.15 - Sistema sperimentale configurato per l'esecuzione della prova

- Le immagini, scaricate su un PC, vengono analizzate con la tecnica detta “*Particle Image Velocimetry*” (PIV) che permette la determinazione del campo degli spostamenti delle particelle interessate dall’azione del getto.

4.5 La tecnica Particle Image Velocimetry – PIV

La tecnica Particle Image Velocimetry (PIV) è una tecnica ottica che consente la misura degli spostamenti e quindi delle velocità di campi di particelle a partire da una serie di immagini.

Le immagini memorizzate su un computer, vengono suddivise in maglie quadrate che vengono ricercate, attraverso tecniche statistiche, nelle immagini successive. Non viene quindi ricercata la posizione della singola particella ma bensì di gruppi di queste.

Il metodo viene da esperienze nello studio della fluidodinamica in cui i fluidi in questione vengono additivati con particelle traccianti (Raffel e Willert C. 1998).

Oggi viene utilizzato nella meccanica delle terre, per la misura delle deformazioni dei terreni (White e Take 2002), specialmente se rapide come quelle

dovute a frane, colate di fango o movimenti sismici.

La tecnica consente la misura quantitativa di fenomeni dinamici anche estremamente rapidi nel caso in cui venga accoppiata alla ripresa ad alta velocità. Il suo sviluppo è avvenuto in seguito alla crescita tecnologica dei calcolatori elettronici grazie alla quale il tempo di elaborazione del singolo fotogramma è passato da 24-48 ore a qualche secondo. Le macchine fotografiche, o di video ripresa, permettono attualmente la cattura di migliaia di immagini al secondo in modo relativamente economico. I motivi di sviluppo della tecnica possono essere così riassunti:

1. crescita ed economicità delle tecnologie informatiche e quindi riduzione dei tempi di elaborazione e rapidissimo sviluppo della fotografia digitale.
2. possibilità di applicazione in moltissimi campi: possono essere studiati fenomeni alle scale più diverse, dallo studio dei moti dei microorganismi in microbiologia, allo studio dei moti in atmosfera (es. uragani) in meteorologia.
3. capacità di studio quantitativa dei fenomeni dinamici, flussi di fluidi, di gas, di particelle o misti.
4. necessita di verifica di codici di calcolo, oggi sempre maggiore.
5. grande accuratezza.
6. grande risoluzione sia spaziale sia temporale (questo aspetto è legato più che altro alle tecnologie fotografiche).
7. massimizzazione dell’area di misura e del volume dei dati sperimentali.
8. non intrusività: il sistema di misura non influenza in nessun modo il fenomeno oggetto dell’analisi.

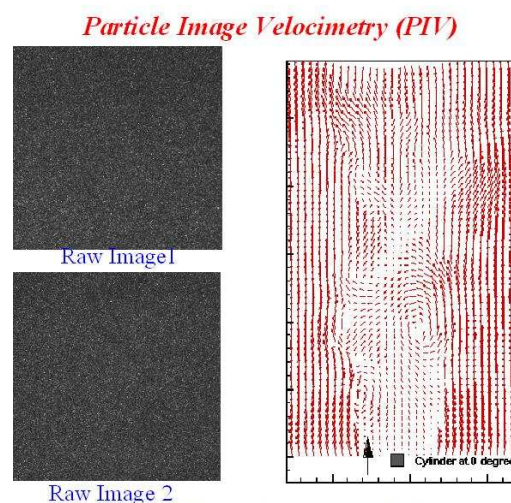


Figura 4.16 - Analisi PIV del flusso fluido dentro un cilindro

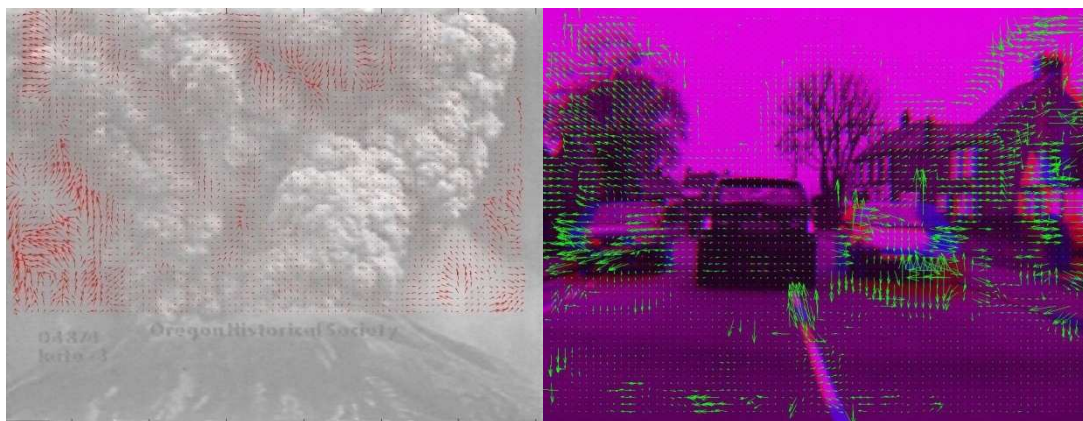


Figura 4.17 - Esempi di applicazioni PIV - a sinistra: la velocità dei gas emessi in un'eruzione vulcanica, a destra: le velocità di autoveicoli

4.5.1 Principi del PIV

Le tecniche del Particle Image Velocimetry, Speckle Velocimetry o Particle Image Displacement Velocity o ancora Particle Tracking Velocity (PTV) sono basate tutte sullo stesso principio e si realizzano in modo simile.

L'apparato sperimentale è costituito da diversi sub-apparati e la descrizione che segue è riferita al campo della fluidodinamica in cui tali tecniche sono nate.

Il fluido viene additivato con particelle traccianti, che vengono illuminate su un piano di flusso in 2 o più tempi successivi. La luce da esse riflessa viene registrata in una serie di immagini.

Lo spostamento delle particelle viene determinato attraverso l'elaborazione PIV.

Si tratta spesso del trattamento di enormi quantità di dati che rendono necessario l'uso di sofisticate tecniche di post-processamento e che permettono la visualizzazione e la sintesi dei risultati.

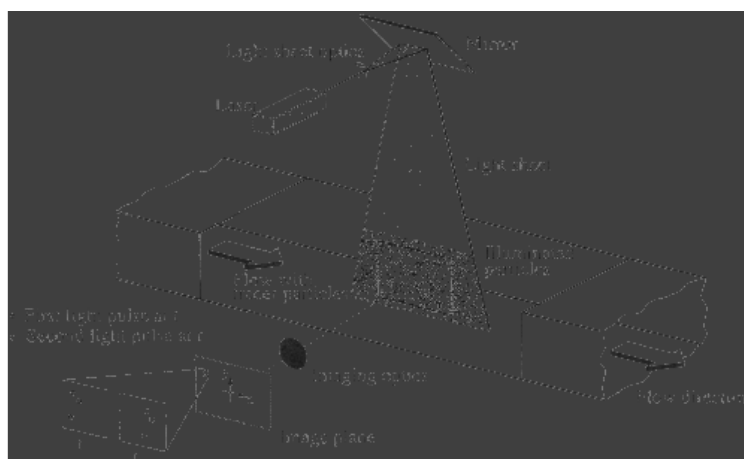


Figura 4.18 - Schema di un apparato per l'analisi PIV

Un tipico apparato (Figura 4.18) è costituito da un piano di flusso che viene illuminato da un laser per due volte in sequenza, con un ritardo che dipende dalla velocità del flusso in analisi e dall'ingrandimento dell'immagine ripresa, e quindi dell'area illuminata. Un'assunzione fondamentale della tecnica è che le particelle abbiano la stessa velocità del flusso e per questo dovranno essere opportunamente scelte per numero e dimensioni.

La luce riflessa dal tracciante viene catturata attraverso una lente o da un negativo fotografico (oggi in completo disuso in questo ambito) o da un sensore CCD¹⁰.

L'elaborazione delle immagini digitali registrate avviene dividendo l'area d'indagine in una maglia di sottoaree, di opportune dimensioni, tipicamente quadrate indicate con il termine *patch*.

Il vettore spostamento locale della singola maglia, tra una immagine e la successiva, viene ottenuto, attraverso il calcolo dell'auto o della cross correlazione della stessa con le maglie sulla foto successiva. Per motivi di tempo di calcolo la ricerca non viene eseguita su tutta l'immagine successiva ma entro una sua porzione. La velocità viene calcolata tenendo conto del tempo intercorso tra la ripresa delle due immagini (e quindi delle due illuminazioni) e scalata tenendo conto dell'ingrandimento utilizzato.

Nel seguito tutto il processo sarà riportato nel dettaglio, per il caso in studio.

La procedura viene ripetuta per tutte le maglie e per tutte le immagini. Il risultato finale è il campo di velocità di tutte le maglie per tutto l'intervallo di tempo corrispondente alla sequenza di le immagini.

4.5.2 Particolarità, vantaggi e svantaggi delle misure PIV

Misure **non intrusive**: non influenzano in nessuno modo il fenomeno in studio. Questa è una caratteristica di tutte le misure ottiche, mentre, così non sono le misure tipicamente utilizzate in fluidodinamica (es. tubo di Pito), ma anche nella meccanica delle terre (White e Take 2002). Questo permette misure in flussi veloci e turbolenti anche in prossimità di interfacce di bordo.

Misure **a tutto campo**: può essere effettuata la misura contemporanea di grandi parti di flusso o di campione, nessuna altra tecnica permette questo tranne il Laser Doppler (DGV Doppler Global Velocity)(Meyers e Komine 1991), mentre tutte le altre tecniche, permettono solo misure puntuali, anche se alcune, possono garantire maggiore risoluzione temporale maggiore,. La risoluzione temporale è l'unica fattore limitante per la tecnica PIV, sebbene oggi esistano macchine di ripresa fotografica, che arrivano ad acquisire oltre 20000 immagini al secondo.

Misure **indirette** della velocità (nei fluidi): come in altri sistemi come il Laser Doppler, non viene misurata la velocità del fluido, ma quella delle particelle utilizzate come tracciante. Questo costituisce un problema soprattutto se si vogliono misurare le velocità di fluidi che già trasportano particelle solide (flussi bifase), inoltre pone il problema della scelta del tipo e della quantità di tracciante da utilizzare. La differenza di velocità tra fluido (*Velocità Lag*) e particelle cresce al crescere della dimensione delle particelle.

¹⁰ Un **CCD** (acronimo di **Charge Coupled Device**) consiste in un circuito integrato formato da una riga, o da una griglia, di elementi semiconduttori (photosite) in grado di accumulare una carica elettrica (*charge*) proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce. Questi elementi sono accoppiati (*coupled*) in modo che ognuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico, possa trasferire la propria carica ad un altro elemento adiacente. Inviando al dispositivo (*device*) una sequenza temporizzata d'impulsi, si ottiene in uscita un segnale elettrico grazie al quale è possibile ricostruire la matrice dei pixel che compongono l'immagine proiettata sulla superficie del CCD stesso. Questa informazione può essere utilizzata direttamente nella sua forma analogica, per riprodurre l'immagine su di un monitor o per registrarla su supporti magnetici, oppure può essere convertita in formato digitale per l'immagazzinamento in *file* che ne garantiscano il riutilizzo futuro.

La distribuzione del tracciante (nei fluidi): mentre per l'osservazione qualitativa del fenomeno è spesso più efficace una maggiore densità di tracciante nelle aree di maggiore interesse (es. spigoli, interfacce), o in particolari condizioni di moto (es. vortici), nel caso della tecnica PIV è necessaria una distribuzione di tracciante la più uniforme possibile.

L'illuminazione: specialmente per applicazioni in cui si debba misurare la velocità di particelle particolarmente piccole, come per esempio nel caso dei gas (Figura 4.19), è necessario l'uso di una illuminazione particolarmente potente, le particelle più piccole possono riflettere meno alla luce, per cui è necessario trovare il giusto compromesso tra illuminazione, dimensioni delle particelle e accuratezza nella misura delle velocità (*velocity lag*).

Lo stesso vale nel caso di riprese ultraveloci, in cui il tempo di acquisizione della singola immagine è molto piccolo (μsec) e quindi sia molto ridotto il tempo di esposizione (si rischia la sottoesposizione).



Figura 4.19 - Ripresa di un flusso gassoso

La densità delle particelle nelle immagini acquisite: la letteratura riporta e distingue tre casi (Adrian 1991), a cui corrispondono tre tecniche di analisi differenti, sebbene basate sullo stesso principio:

- **bassa densità:** può essere individuata la singola particella tra 2 immagini successive, per l'analisi si effettua con metodi detti di tracciamento o Particle Tracking Velocimetry (PTV);
- **media densità:** si possono ancora osservare le particelle singole, ma non è possibile seguirle sulle immagini successive, per l'analisi si usano metodi di tipo statistico (PIV);
- **alta densità:** non si distinguono più le singole particelle, debbono utilizzarsi metodi tipo Laser Speckle Velocimetry (LSV).

Le componenti della velocità: i metodi standard permettono la misura di 2 componenti della velocità (2DPIV), ma esistono oggi tecniche che permettono la misura di tutte e 3 le componenti della velocità, dette: tecniche olografiche, stereoPIV, o dual plane PIV o semplicemente 3DPIV (Hinsch 1995).

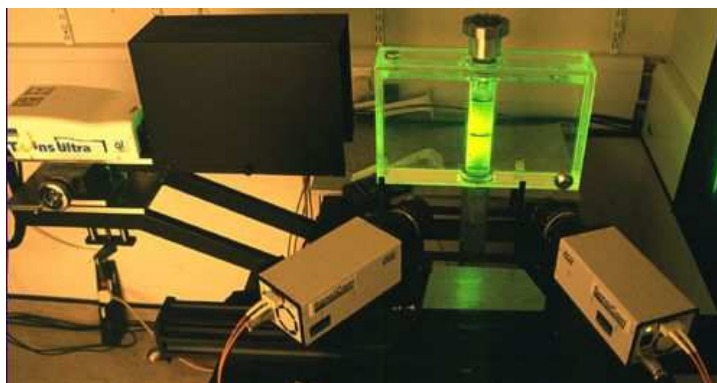


Figura 4.20 - Apparato per lo studio di un flusso tridimensionale con la tecnica stereoPIV

La risoluzione temporale: la frequenza di acquisizione è il fattore limitante della tecnica, nel caso di fenomeni veloci è necessario acquisire le immagini con frequenze sufficientemente elevate. Il limite non è propriamente del metodo, se non per l'aumento del tempo di calcolo e

quindi la limitazione sul tempo totale (numero di immagini, e quindi di dati) che si può analizzare, ma della tecnologia delle video ripresa ad alta velocità.

La ripetibilità: la registrazione dell'esperimento, rende meno importante la sua ripetizione, e rende possibile, invece, l'utilizzo sulla stessa base di dati l'uso più tecniche di analisi e anche numerose ripetizioni di queste, al fine di ottimizzarle.

4.5.3 Una tecnica concorrente X-RAY-FILM

Una tecnica di tipo simile e antagonista al PIV, è quella proposta da Gerber (1928), che consiste nell'acquisizione di una sequenza di scansioni ai Raggi X, di un opportuno tracciante inserito nel mezzo. La tecnica però alcuni svantaggi:

- 1) alto costo
- 2) bassa risoluzione temporale (3-15 minuti per immagine)
- 3) , è necessario usare elevate densità di tracciante e questo rischia di influenzare il fenomeno in analisi e di inficiare la misura.
- 4) difficile distribuzione del tracciante nel campione, questo come detto sopra è un problema tipico anche del PIV, quando questo viene applicato ai fluidi, mentre non lo è nel caso della sua applicazione allo studio dei materiali granulari.

4.6 Il software *geoPIV*

Il metodo PIV, sviluppato per lo studio di tipo di fluidodinamico (Adrian 1991), è stato solo recentemente utilizzato per la misura di grandezze geotecniche, come spostamenti, velocità, sforzi indotti sui grani da perturbazioni esterne (White e Take 2002).

Il metodo è implementato in numerosi codici di calcolo fra i quali uno dei più diffusi ed efficienti è URAPIV (APPENDICE 1). Si tratta di un software libero su piattaforma Matlab della MathWorks, Inc. Software, per analisi di immagini in bianco e nero (scala di grigi). Ne esistono numerosi altri, per lo più commerciali, capaci di analizzare anche immagini a colori e riprese stereo.

Il software utilizzato in questo studio è invece il *geoPIV8*, sviluppato e validato dal Dipartimento di Geotecnica Ambientale dell'Università di Cambridge, il quale è specializzato nell'analisi di carattere geotecnico.

Il *geoPIV8* è costituito da una serie di *routine* che permettono sia l'analisi sia il trattamento e la visualizzazione dei risultati a partire da una serie di immagini in bianco e nero.

L'analisi con la tecnica del PIV viene sviluppata attraverso le seguenti fasi:

- A. Viene acquisita una serie di immagini digitali sequenziali del fenomeno posto sotto analisi. La frequenza di campionamento delle immagini è scelta a priori in base alla stima della velocità di sviluppo del fenomeno oggetto dello studio. E' dunque noto il Δt tra due immagini sequenziali.

Le immagini digitali vengono trasformate in matrici $n \times m$ in cui ogni valore corrisponde ad un pixel della foto e le cui dimensioni sono quindi pari alle dimensioni della foto in pixel (es. se la foto ha una risoluzione di 1280x1024 pixel la matrice avrà dimensioni $n=1280$ e $m=1024$). Ogni elemento della matrice rappresenta il tono di grigio del pixel in quella posizione e può assumere un valore compreso tra 0 (nero) e 255 (bianco).

- B. Procedura *geoMESHuv8.p* - L'utente indica al software la zona d'interesse per l'analisi delle immagini. Questa viene suddivisa mediante una maglia quadrata denominata *mesh*

(Figura 4.21), di lato non inferiore a 6 pixel. Ciascuna casella quadrata è denominata *patch*. Come punto rappresentativo di ogni *Patch* viene preso il suo centro geometrico di coordinate (u,v) . L'unità di misura utilizzata in questa fase è il pixel e ad ognuna di esse si attribuiscono numeri progressivi di identificazione.

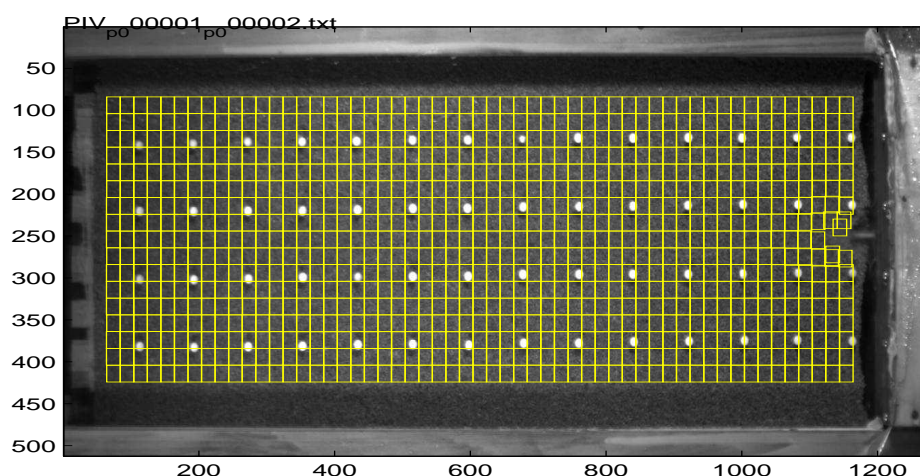


Figura 4.21 – Esempio di Mesh 20x20 pixel

Le informazioni relative alla *mesh* sono contenute in un file di testo (Tabella 4.2 - File di testo della matrice della *mesh*), costituito da 8 colonne, e righe pari al numero totale delle *patch*. Delle 8 colonne solo le prime 3 servono a rappresentare il reticolo mentre le successive cinque serviranno successivamente al software per il calcolo. Nelle tre colonne sono riportati: un indice identificativo della maglia e le coordinate u e v del suo baricentro (in pixel).

Tabella 4.2 - File di testo della matrice della *mesh*

N° <i>patch</i>	$u_o(\text{pixel})$	$v_o(\text{pixel})$	$u_f(\text{pixel})$	$v_f(\text{pixel})$	$du(\text{pixel})$	$dv(\text{pixel})$	size(pixel)
223	882,96	178,92	882,96	178,92	0	0	20
224	914,93	178,85	914,93	178,85	0	0	20
225	946,98	178,78	946,98	178,78	0	0	20
226	979,01	178,66	979,01	178,66	0	0	20
227	1011,03	178,59	1011,03	178,59	0	0	20
228	1043,03	178,32	1043,03	178,32	0	0	20
229	1075,11	178,11	1075,11	178,11	0	0	20
230	1107,12	178,15	1107,12	178,15	0	0	20
262	882,91	210,79	882,91	210,79	0	0	20
263	914,9	210,84	914,9	210,84	0	0	20
264	946,86	210,25	946,86	210,25	0	0	20
265	978,92	210,13	978,92	210,13	0	0	20

- C. Procedura **geoPIV8.p** - Le immagini vengono analizzate in modo sequenziale, due alla volta. Il software parte ricercando la prima *patch* sulla prima immagine ($t=t_1$) e sulla seconda immagine ($t=t_2$) (Figura 4.22). La ricerca non viene eseguita su tutta la seconda immagine, ma solo entro una certa zona di ricerca, il cui raggio viene scelto dall'utente. Il codice di calcolo elabora una funzione di correlazione, tra la matrice di colore della prima *patch* sulla prima immagine ($t=t_1$), e la matrice che rappresenta la zona di ricerca sulla seconda immagine ($t=t_2$). Viene ricercato il massimo di tale funzione, e le coordinate di questo punto saranno le nuove coordinate del baricentro della prima *patch* sulla seconda immagine ($t=t_2$). Il vettore spostamento della prima *patch* tra il tempo 1 e il tempo 2, sarà quindi il vettore congiungente il baricentro della *patch* sulla prima immagine e quello

della stessa *patch* (o meglio di quella ad essa più simile) ricercato sulla seconda immagine. La velocità è pari allo spostamento moltiplicato per la frequenza di acquisizione.

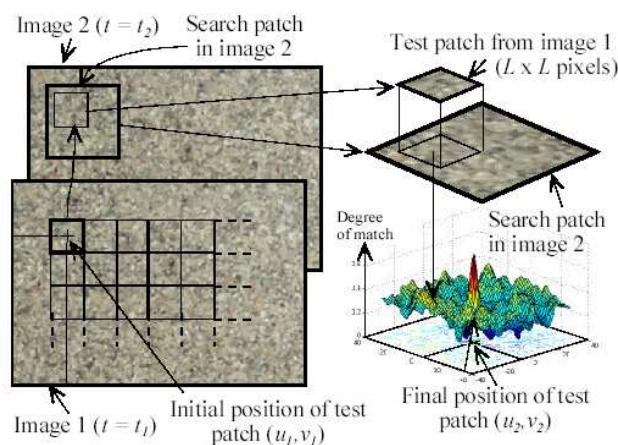


Figura 4.22 - Schema dell'analisi PIV

- D. L'operazione viene ripetuta per tutte le *patch* della mesh e per tutte le immagini. Il risultato che si ottiene è il campo degli spostamenti nella zona scelta dall'utente (*mesh*), per ogni immagine e quindi per ogni tempo, nella sequenza indicata dall'utente.
- E. Il risultato dell'analisi di n immagini è espresso attraverso $n-1$ file di testo, in cui sono riportate la posizione iniziale e finale della *patch*, intendendo come iniziale quella sulla immagine i -esima e finale quella sulla immagine $(i+1)$ -esima. Ogni file contiene una matrice di dati (Tabella 4.3), di 8 colonne e righe pari al numero totale delle *patch*; il formato è lo stesso del file della mesh, che difatti, rappresenta la posizione delle *patch* al tempo iniziale. La prima colonna contiene il numero identificativo della *patch*, la seconda e la terza le coordinate iniziali ($u_o(t_i), v_o(t_i)$), la quarta e la quinta le coordinate finali ($u_f(t_{i+1}), v_f(t_{i+1})$), la sesta e la settima rappresentano gli spostamenti tra t_i e t_{i+1} (du, dv), l'ottava riporta la dimensione del lato della *mesh*. Il risultato è ancora espresso in pixel.

Tabella 4.3 - Risultato numerico dell'analisi geoPIV8

N °Patch	$u_o(\text{pixel})$	$v_o(\text{pixel})$	$u_f(\text{pixel})$	$v_f(\text{pixel})$	$du(\text{pixel})$	$dv(\text{pixel})$	size(pixel)
223	882,96	178,92	882,95	178,9	-0,01	-0,02	20
224	914,93	178,85	914,93	178,83	0	-0,02	20
225	946,98	178,78	946,99	178,77	0,01	-0,01	20
226	979,01	178,66	979,03	178,66	0,02	0	20
227	1011,03	178,59	1011,04	178,58	0,01	-0,01	20
228	1043,03	178,32	1043,05	178,32	0,02	0	20
229	1075,11	178,11	1075,13	178,1	0,02	-0,01	20
230	1107,12	178,15	1107,14	178,15	0,02	0	20
262	882,91	210,79	882,92	210,73	0,01	-0,06	20
263	914,9	210,84	914,9	210,82	0	-0,02	20
264	946,86	210,25	946,88	210,24	0,02	-0,01	20
265	978,92	210,13	978,92	210,13	0	0	20

- F. Il risultato numerico racchiuso nella serie di file, può essere visualizzato in due modalità. La prima è una rappresentazione in forma di vettori spostamento, tra due tempi, t_1 e t_2 , scelti dall'utente (Figura 4.23).

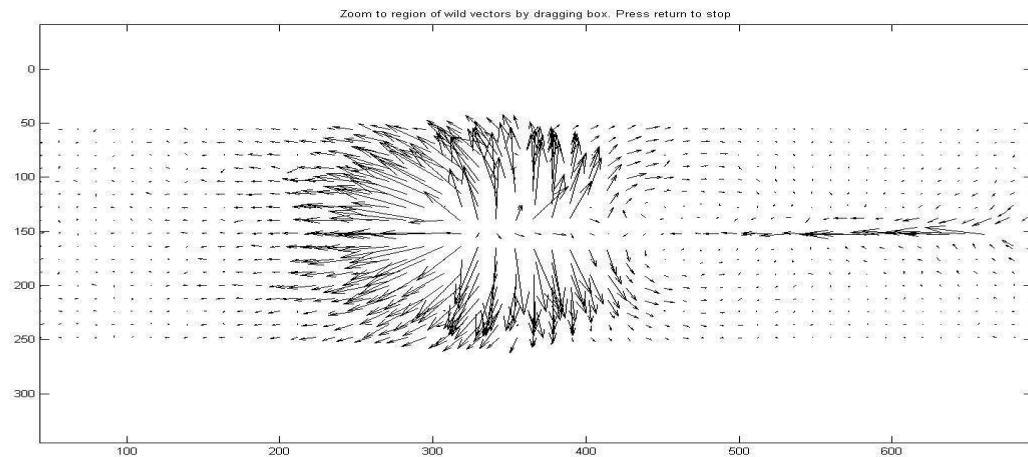


Figura 4.23 - Esempio di rappresentazione vettoriale dei risultati dell'analisi *geoPIV8*

La seconda è invece la rappresentazione della posizione delle *patch* ad un certo tempo t , fissato dall'utente. Queste rappresentazioni permettono solo valutazioni di carattere qualitativo.

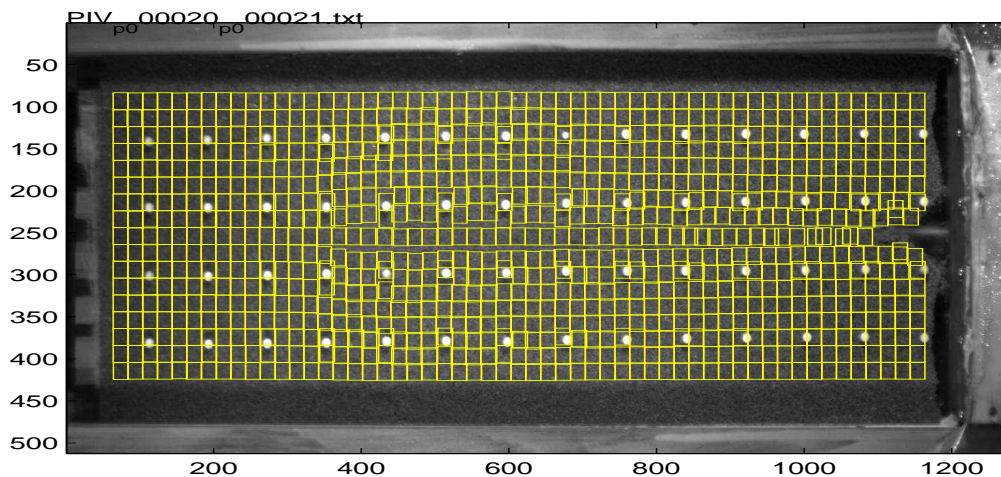


Figura 4.24 - Esempio di rappresentazione della posizione delle *patch* al tempo t

- G. L'elaborazione restituisce il risultato nelle coordinate dello spazio immagine ($u; v$), le quali hanno come unità di scala il pixel. Per concludere il calcolo è necessario quindi passare dallo spazio-immagine allo spazio-reale correggendo, inoltre, le distorsioni dovute alla non perfetto allineamento tra asse della telecamera e normale alla superficie del campione. Tale processo, prende il nome di calibrazione.
- H. Il risultati scalati, ma ancora in forma di file di testo nella forma numerica suddetta, possono poi essere elaborati mediante *routine* specializzate e realizzate *ad hoc*.

4.6.1 Possibili problemi di analisi

La scelta dei parametri di calcolo, come ad esempio la dimensione del lato della *patch*, è cruciale per l'analisi. Di seguito vengono riportati i tipici problemi che l'utente deve affrontare nell'analisi, e contestualmente vengono riportate le possibili soluzioni e le motivazioni che le debbano guidare.

4.6.1.1 Zona di ricerca troppo piccola

La zona di ricerca delle *patch* deve essere scelta maggiore del massimo spostamento previsto o stimato dalla sequenza di immagini per la *patch*, in caso contrario lo spostamento della *patch* non potrà essere individuato in modo corretto, e con grande probabilità si avrà un vettore privo di significato (*wild vector*).

Il problema viene risolto ingrandendo la zona di ricerca, fino al massimo, ad un valore pari alla minima dimensione dell'immagine, questo comporta un aumento del tempo macchina, il quale potrebbe divenire così elevato da rendere l'analisi impraticabile, per cui è necessario un compromesso.

4.6.1.2 Frequenza di acquisizione troppo bassa

Lo spostamento massimo di una *patch* tra due fotogrammi successivi dipende dalla frequenza di acquisizione, più questa è alta, minori saranno gli spostamenti. Nel caso in cui durante l'analisi appaiono numerosi *wild vector*, una possibile soluzione è quella di ingrandire la dimensione delle *patch*, se questo non bastasse sarà necessario ripetere l'esperimento incrementando la frequenza di acquisizione.

L'aumento della dimensione della *patch* porta ad una inevitabile perdita di accuratezza nella misura.

4.6.1.3 Dimensione della patch troppo grande

L'uso di *patch* di piccole dimensioni (es. 6x6 pixel) incrementa la risoluzione spaziale della misura, mentre le dimensioni troppo grandi producono errori di *smearing* nella ricerca degli spostamenti, poiché le *patch* contengono poche informazioni e tendono a modificarsi al loro interno più di *patch* di dimensioni minori in cui a parità di altre condizioni le modifiche sono mediamente minori.

4.6.1.4 Dimensione della patch troppo piccola

Le *patch* di dimensioni troppo piccole (es. 6x6 pixel) contengono un minor numero d'informazione e quindi sono più sensibili rispetto a quelle di grandi dimensioni (es. 64x64 pixel) a modifiche del loro aspetto o variazioni di illuminazione. La piccola dimensione, quindi, porta ad una minore precisione nella misura anche se questo svantaggio è compensato da una migliore risoluzione spaziale nel campo di misura degli spostamenti.

4.6.1.5 Macchie sulla superficie trasparente

Gli eventuali macchie o graffi presenti sulla superficie trasparente possono coprire una parte del campione, introducendo così un disturbo nell'analisi.

4.6.1.6 Tessitura insufficiente: *wild vector*

Se l'immagine non contiene sufficiente tessitura e cioè se, per esempio, vi è troppa poca variazione nella luminosità o nel colore delle particelle che compongono il campione, possono intervenire errori nella ricerca della massima correlazione. Altri errori possono derivare da disturbi ambientali (*rumore*). Il caso della tessitura insufficiente può essere parzialmente risolto incrementando la dimensione delle *patch*.

4.7 La misura della velocità di penetrazione e delle deformazioni indotte dal getto d'acqua sul terreno

L'obiettivo principale della sperimentazione, realizzata presso il DIGITA, è stata la misura della velocità di penetrazione del getto in un campione di terreno e la definizione di relazioni che esprimano la sua dipendenza dai parametri operativi del getto d'acqua: potenza idraulica, pressione e portata. La misura della velocità di penetrazione è stata determinata in modo indiretto dalla misura del campo degli spostamenti nel tempo, determinato con l'analisi PIV. A tal fine è stato assunto che l'istante di passaggio del getto corrisponda all'istante in cui è massima la variazione degli spostamenti. Quindi, posto che il getto abbia il suo asse parallelo all'asse x , la procedura utilizzata è la seguente:

viene individuata una sezione lungo le y su cui si vuole misurare la velocità di

- 1) penetrazione, questa sarà detta traguardo (Figura 4.25);
mediante il codice di calcolo *piv_processXY* (APPENDICE 2), vengono ricercate nei file
- 2) di testo prodotti dal *geoPIV8* ed in particolare nel file *mesh*, le n *patches* intersecate dalla sezione precedentemente individuata e quindi le posizioni al tempo zero (tempo di entrata del getto nel campione) delle stesse. Le *patches* vengono numerate nel senso delle ordinate crescenti (dall'alta verso il basso in Figura 4.25) e vengono chiamate $p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n$.

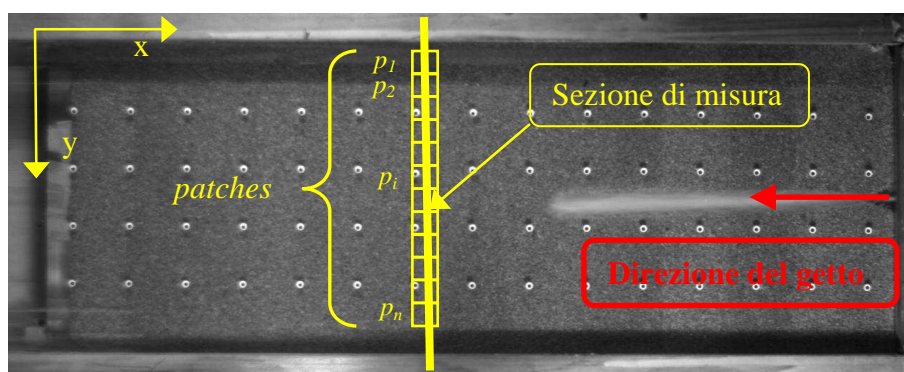


Figura 4.25 - Sezione per la misura (o traguardo) della velocità di penetrazione

- 3) Il codice *piv_processXY* ricerca i dati relativi alle *patches* individuate al punto 2), in tutti i file di testo prodotti dall'analisi prodotta dal *geoPIV8*, e costruisce una matrice che contiene le posizioni delle suddette *patches* e le corrispettive variazioni per ogni intervallo di tempo;
- 4) viene ricercata la massima variazione di spostamento, sia lungo l'asse x ($\max(dx)$) sia lungo l'asse y ($\max(dy)$) per ognuna delle patch individuate al punto 2), spostamenti definiti tra il tempo t_0 e il tempo t_i , come:

$$\begin{aligned} dx_{p_i} &= x_{p_i}(t_i) - x_{p_i}(t_0) \\ dy_{p_i} &= y_{p_i}(t_i) - y_{p_i}(t_0) \end{aligned} \quad (4.1)$$

dove la coordinata x della posizione iniziale delle n patches corrisponde a quella del traguardo su cui viene effettuata l'analisi, e cioè:

$$x_{p_i}(t_0) = x_{trag}$$

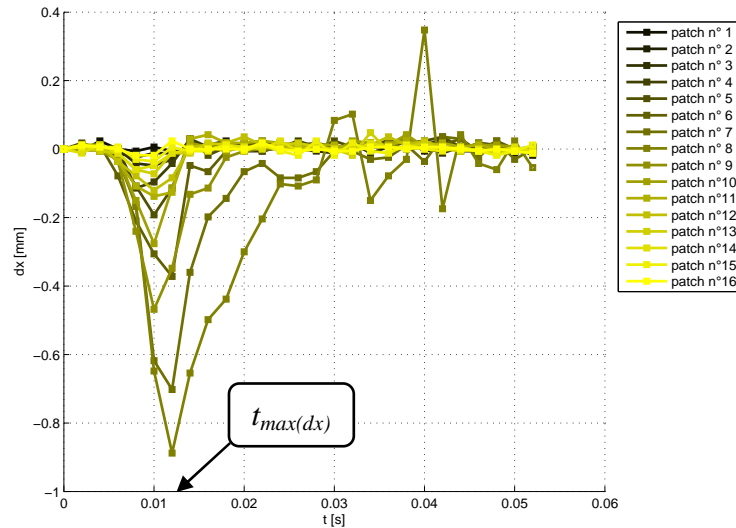


Figura 4.26 - Grafico variazioni dello spostamento (dx) per le n patch rispetto al tempo

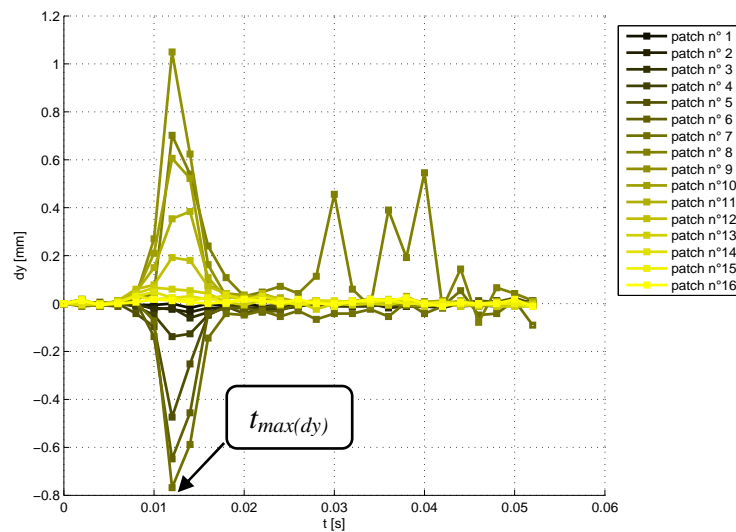


Figura 4.27 - Grafico variazioni dello spostamento (dy) per le n patch rispetto al tempo

- 5) Il tempo a cui corrisponde lo spostamento massimo ($t_{p_i}(\max(ds_{p_i}))$), per ogni patch, viene assunto come l'istante in cui il getto raggiunge la patch;

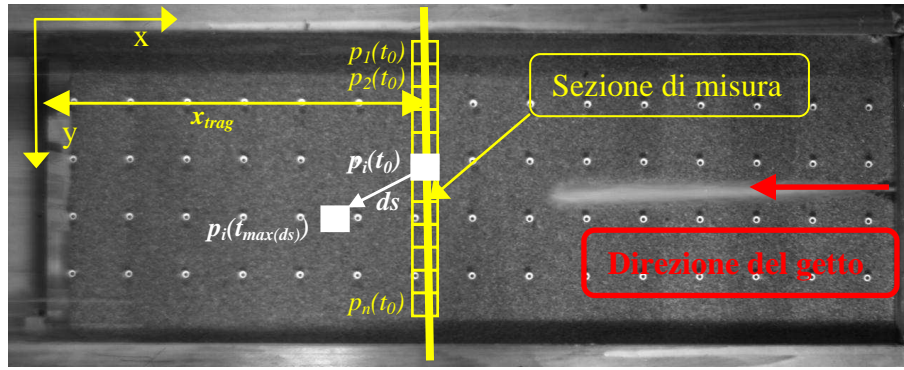


Figura 4.28 - Sezione per la misura (o traguardo) della velocità di penetrazione

- 6) Viene calcolata la velocità di penetrazione del getto per ognuna delle n patches intersecate dal traguardo al tempo zero (tempo di entrata del getto nel campione), dividendo lo spostamento relativo cumulato fino al tempo di massima variazione dello stesso $t_{pi}(\max(ds_{pi}))$, l'intervallo di tempo intercorso tra l'istante di entrata del getto nel campione e tempo stesso con la formula:

$$v_{xp_i} = \frac{x_{p_i}(t_0) - \sum_{j=t_0}^{t_{i\max(dx)}} dx_{p_i}(t_j)}{t_{p_i}(\max(dx_{p_i}))} \quad (4.2)$$

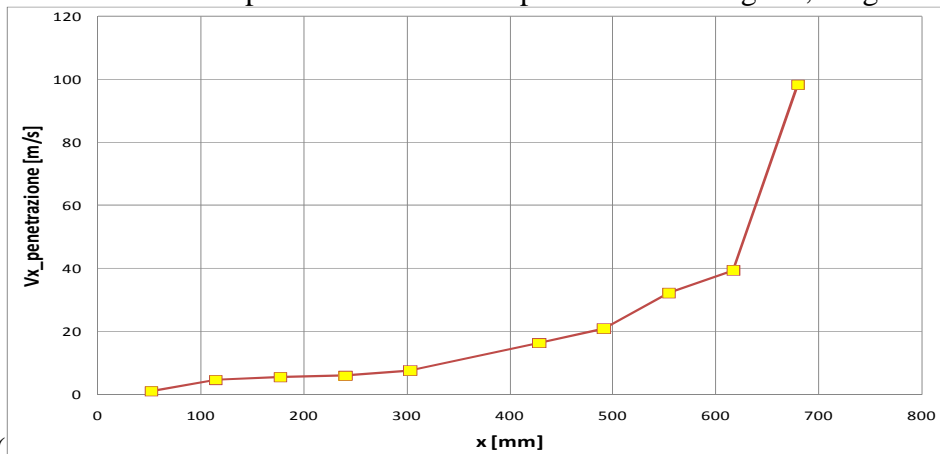
Dove per quanto detto in precedenza la posizione delle patch al tempo zero è pari alla coordinata x del traguardo, e quindi:

$$x_{pit0} = x_{trag}.$$

Analogamente si può scrivere per la V_y :

$$v_{yp_i} = \frac{y_{p_i}(t_0) - \sum_{j=t_0}^{t_{i\max(dy)}} dy_{p_i}(t_j)}{t_{p_i}(\max(dy_{p_i}))} \quad (4.3)$$

- 7) Vengono poi selezionate le velocità V_{xi} penetrazione delle sole patch centrali (in numero di circa 5), cioè di quelle che sono più vicine all'asse del getto e che quindi subiscono i maggiori spostamenti. Sui valori di queste viene operata una media aritmetica che fornirà il valore della velocità di penetrazione.
- 8) Le operazioni da 1) a 7) vengono ripetute per un numero di sezioni equispaziate (circa 11, una ogni 7 cm, è cioè ogni 100 pixel nella scala immagine) come in Figura 4.29, tale permettere la costruzione del profilo di velocità di penetrazione del getto, lungo l'asse del



campione (

- 9) Figura 4.30).

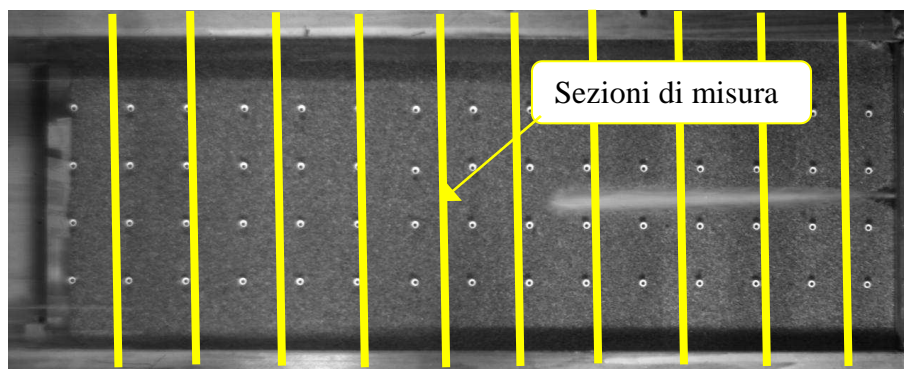


Figura 4.29 - Sezioni per la misura della velocità di penetrazione



Figura 4.30 - La velocità di penetrazione lungo l'asse del campione

- 10) Contestualmente, per permettere valutazioni riguardo lo stato di deformazione cui è soggetto il materiale, vengono calcolati e graficati, per tutte le patch intersecate dalle sezioni, gli spostamenti relativi $dx_{pi}(t)$ e $dy_{pi}(t)$ (vedi eq.4.1), cumulati nel tempo, sia lungo l'asse x (Figura 4.31), che lungo l'asse y (Figura 4.32).

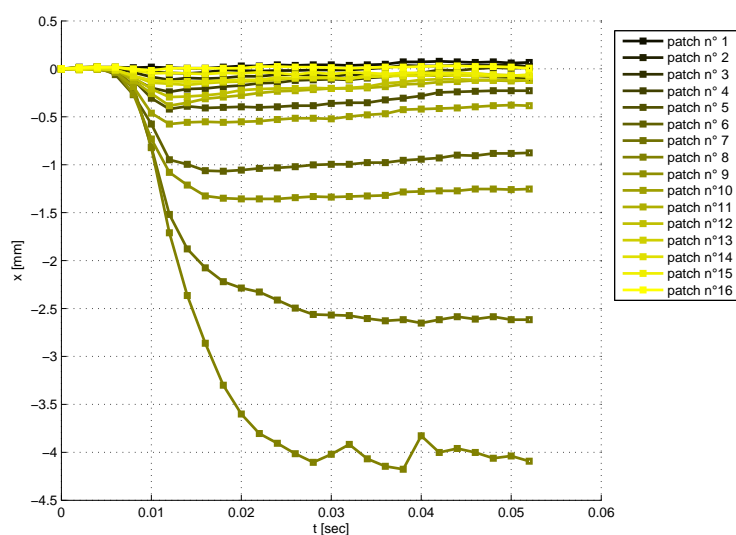


Figura 4.31 - Esempio di grafico degli spostamenti lungo l'asse x cumulati

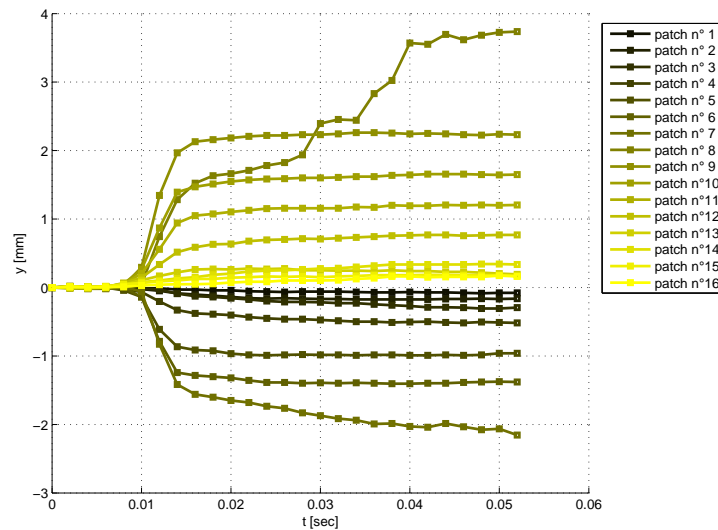
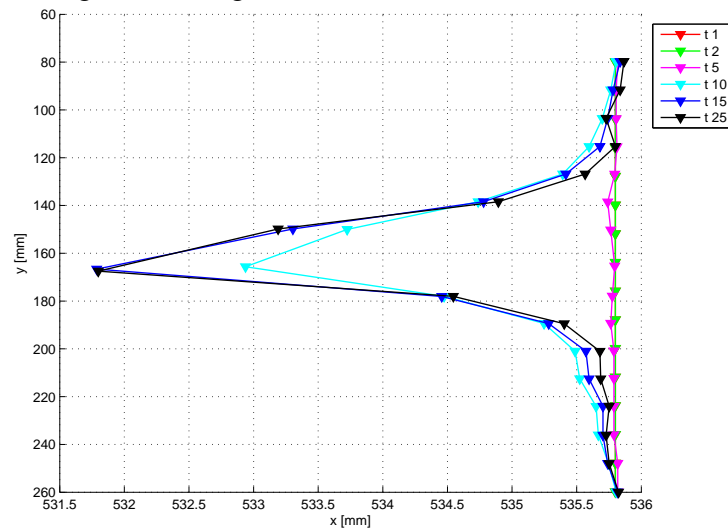


Figura 4.32 - Esempio di grafico degli spostamenti lungo l'asse y cumulati

11) Inoltre, viene costruito il profilo di spostamento in coordinate assolute in tempi diversi e per ogni sezione (traguardo). (Figura 4.33).



ugello avente diametro pari a 0.8 mm, e potenza pari al valore più basso delle tre serie. La sequenza completa è riportata nella Tabella 4.4.

Il valore del coefficiente di contrazione degli ugelli è stato assunto pari a 0.63.

Tabella 4.4 - Sequenza degli esperimenti

Serie	N°Test	P [Mpa]	ϕ_{ugello} [mm]	v [m/s]	Q [l/m]	W [kW]
I	1	60	1	338.3	10	36
	2	100	1	434.2	13	77
	3	130	1	495.0	15	115
II	4	50	1.2	307.0	13	39
	5	80	1.2	395.9	17	79
	6	100	1.2	434.2	19	112
III	7	40	1.4	274.8	16	39
	8	65	1.4	356.8	21	80
	9	80	1.4	395.9	23	110
IV	10	75-80	0.8	395.9	7.5	36

Per una migliore comprensione di quanto detto viene riportato il grafico che lega la pressione di generazione del getto alla potenza idraulica, per i quattro diametri di ugello utilizzati. Nel grafico sono riportate (in colore giallo), le rette, a pari potenza, su cui ricadono le tre serie di prove eseguite.

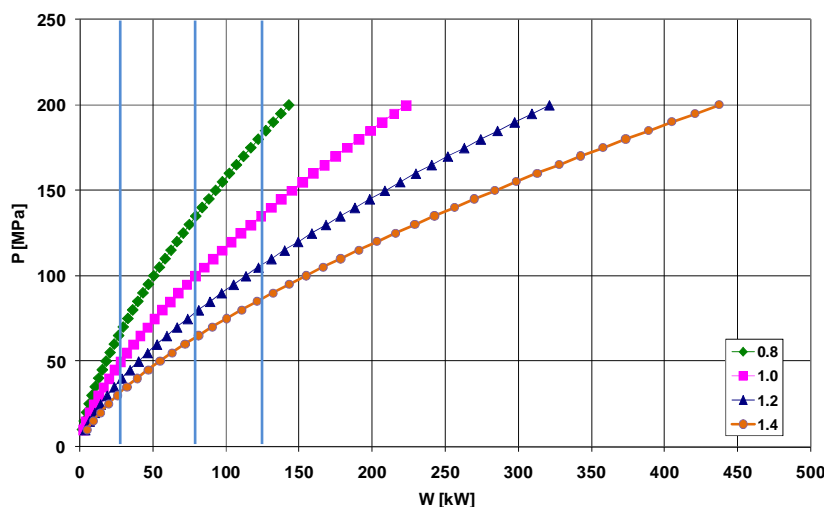


Figura 4.34 - Relazione tra pressione e potenza idraulica per diametri dell'ugello di 0.8-1-1.2-1.4 mm

Le prove sono state eseguite posizionando la lancia in modo che il getto d'acqua risulti ad una distanza di 0.75 cm dal bordo interno del cristallo attraverso il quale avviene la video ripresa. Tale distanza è stata scelta in base ai risultati di una serie di quattro prove preliminari (a 2 cm, 1 cm, 0.75 cm, 0.5 cm) in cui è stato testato il sistema sperimentale nel suo complesso. In particolare è stata ricercata la posizione della lancia rispetto al vetro che minimizza l'influenza di quest'ultimo sulla prova e che, contemporaneamente, garantisce una buona osservazione del fenomeno.

La distanza di *stand-off*, è stata scelta pari a 1 cm, Questo valore è quello minimo compatibilmente con lo spessore occupato dal sistema di otturazione e del *trigger*.

Tabella 4.5 -Parametri di posizionamento del getto

Parametri di posizionamento del getto		
Distanza getto vetro	[mm]	7.5
Distanza <i>stand-off</i>	[mm]	10

La telecamera è stata impostata (Tabella 4.6) per acquisire con una frequenza di 500 fps (un frame ogni 2 ms) alla risoluzione di 1280 x 512 pixel per un tempo totale di 6.5 secondi di cui il 15% in pre-trigger. Il risultato è una sequenza di 3500 immagini in formato *jpeg*, di dimensione pari a circa 1.25 MB ciascuna e che occupano dunque globalmente circa 2GB.

Tabella 4.6 - Parametri di acquisizione

Parametri di posizionamento del getto		
Risoluzione	[pixel]	1280x512
Frequenza	[fps]	500
Tempo totale acquisizione	[s]	6.5
Pre-trigger	[%]	15
Post-trigger	[%]	85

Per ciascuna prova sono stati analizzati, con *geoPIV8*, 25 fotogrammi (e quindi un tempo 0.05 s) successivi all'istante di apertura del sistema di otturazione. Tale numero risulta sufficiente all'analisi del processo di penetrazione del getto nell'intero campione. I risultati del *geoPIV8* sono stati poi elaborati col codice *piv_processXY*, per la determinazione della velocità di penetrazione del getto. La velocità è stata calcolata per ciascuna prova, in almeno in 11 sezioni del campione, disposte ortogonalmente all'asse del getto e poste a circa 7cm l'una dall'altra. Sono state determinate inoltre, per le stesse sezioni, le deformazioni indotte nel terreno dal passaggio del getto. I risultati dell'elaborazione sono riportati in dettaglio nell'APPENDICE 3.

4.9 I risultati

4.9.1 Risultati qualitativi

L'osservazione del campione al termine della prova e quella del video prodotto dalla camera dimostrano che il raggio di influenza laterale del getto non è costante ma aumenta progressivamente con la distanza del punto considerato dall'ugello e quindi con l'avanzare del getto nel terreno. Si osserva una forma di scavo conica causata dal crescere dello sfrangiamento del getto.

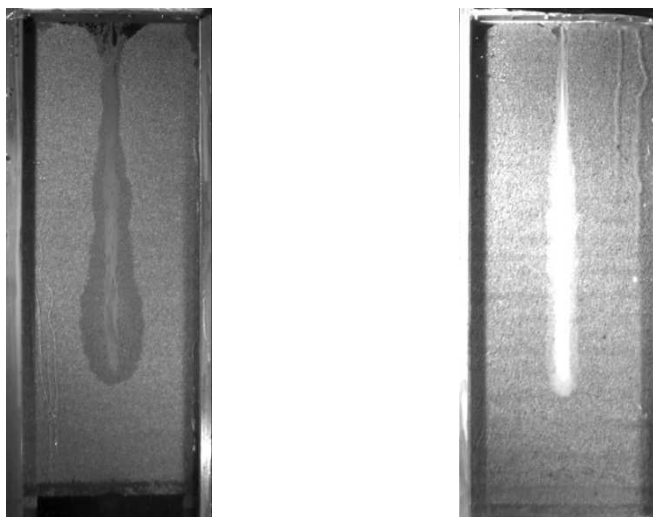


Figura 4.35 - Immagini del cono d'influenza del getto - $W=35$ kW (sinistra) e $W=115$ kW (destra)

L'osservazione delle immagini permette anche di stimare il tempo totale di penetrazione del getto d'acqua attraverso il campione. E' infatti possibile osservare il momento in cui il sistema di otturazione si apre ed il getto inizia a penetrare, il percorso del getto ed il momento in cui l'acqua inizia a fuoriuscire dal fondo del portacampione. Si tratta di una stima grossolana che non permette nessun'altra valutazione, se non l'osservazione che per potenze minori si ha un tempo di attraversamento del campione maggiore.

4.9.2 Risultati dell'analisi PIV

La misura della velocità di penetrazione, della sua variazione (decelerazione) e degli spostamenti indotti nelle singole porzioni di terreno in funzione del tempo viene ottenuta col metodo PIV.

L'elaborazione dei dati PIV produce il profilo di velocità di penetrazione del getto nel materiale. Esso è ottenuto valutando la posizione del getto in un dato istante attraverso la considerazione dei massimi gradienti di spostamento e dividendo il valore del vettore spostamento il tempo.

I risultati, in termini di velocità di penetrazione, sono raccolti nel grafico seguente per tutte le diverse condizioni di prova.

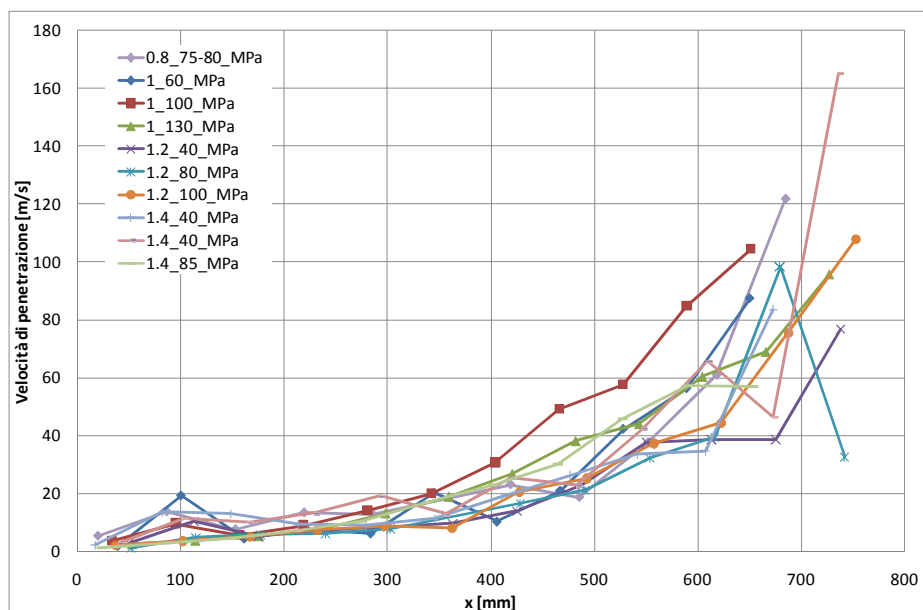
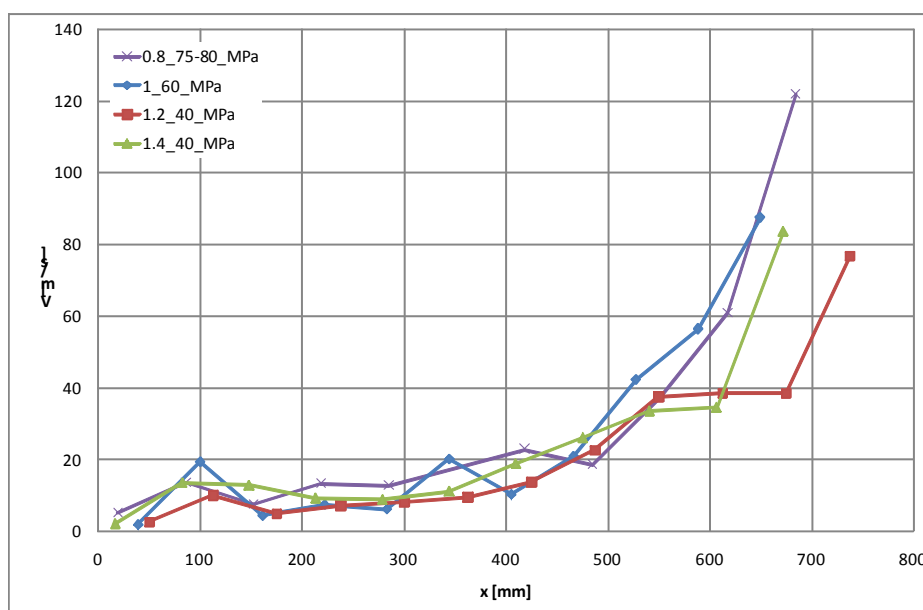
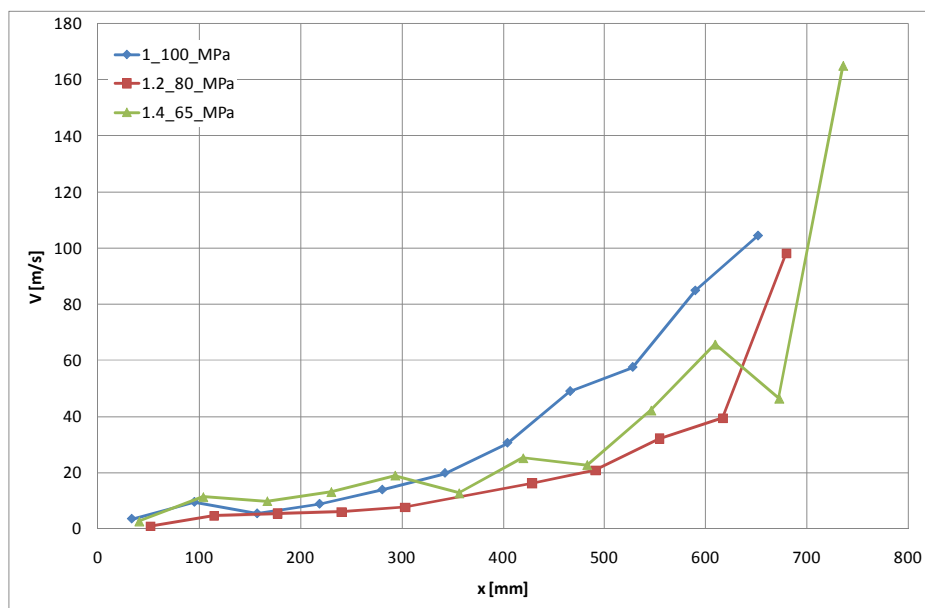
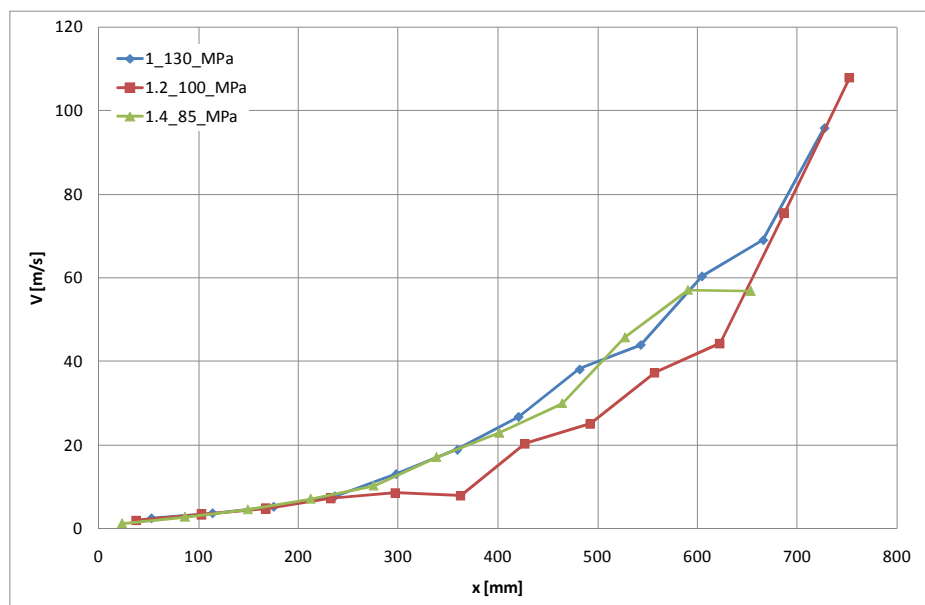


Figura 4.36 - La velocità di penetrazione per tutte le prove

Il grafico mostra che indipendentemente dalle condizioni di prova, la velocità di penetrazione, e quindi l'energia posseduta dal getto, decade in modo esponenziale all'avanzare del getto nel campione. Il suo valore si riduce da un valore pari a circa la metà di quello di uscita dall'ugello, all'entrata nel campione, a un valore ancora dimezzato dopo soli 200 mm di percorso. Successivamente, la riduzione di velocità avviene con minore gradiente e, in corrispondenza del fondo del campione, si osservano ancora velocità dell'ordine di qualche metro al secondo.

Di seguito sono riportate tre figure (Figura 4.37, Figura 4.38 e Figura 4.39), in cui viene confrontato il risultato della misura della velocità di penetrazione per le diverse combinazioni di pressione e portata, ma a pari potenza idraulica impiegata, e questo per i tre valori di 36, 80 e 115 kW della stessa.

Figura 4.37 - La velocità di penetrazione per $W = 35$ kW

Figura 4.38 - La velocità di penetrazione per $W = 80$ kWFigura 4.39 - La velocità di penetrazione per $W = 112$ kW

In tutti i casi è possibile osservare che a parità di potenza di generazione del getto si ha una tendenza alla riduzione della velocità di penetrazione al crescere del valore della portata (e quindi al decrescere della pressione).

Si può concludere che si ottengono maggiori velocità di penetrazione, a parità di potenza impiegata, ma è da tenere in conto il fatto che i sistemi ad alta pressione sono molto più complessi tecnologicamente e quindi costosi, al contrario di quelli ad alta portata che sono relativamente più semplici e meno costosi.

4.10 La velocità di penetrazione nel caso di getto in movimento traslatorio

Una seconda serie di prove, ha affrontato il problema dell'influenza del moto di traslazione dell'ugello in direzione ortogonale al getto, sulla velocità di penetrazione. Per far ciò la lancia

è stata montata su un braccio di supporto collegato a un sistema di movimento azionato da un motore elettrico (vedi 4.2.10).

Si è scelto di operare con i seguenti parametri operativi riportati in Tabella 4.7 - Parametri di prova - movimento traslatorio:

Tabella 4.7 - Parametri di prova - movimento traslatorio

Prove in movimento - Parametri esecutivi		
Pressione (P)	[MPa]	100
Diametro dell'ugello (d)	[mm]	1
Distanza di Stand-off	[mm]	50
Distanza getto-vetro	[mm]	5
Velocità di traslazione	[cm/s]	0.5-0.75-1
Risoluzione telecamera	[pixel]	1280x512
Frequenza di acquisizione	[fps]	500
Tempo totale di acquisizione	[sec]	6,5
Pre-trigger	[%]	15
Totale frame acquisiti		3250

I risultati in termini di velocità di penetrazione sono mostrati di seguito:

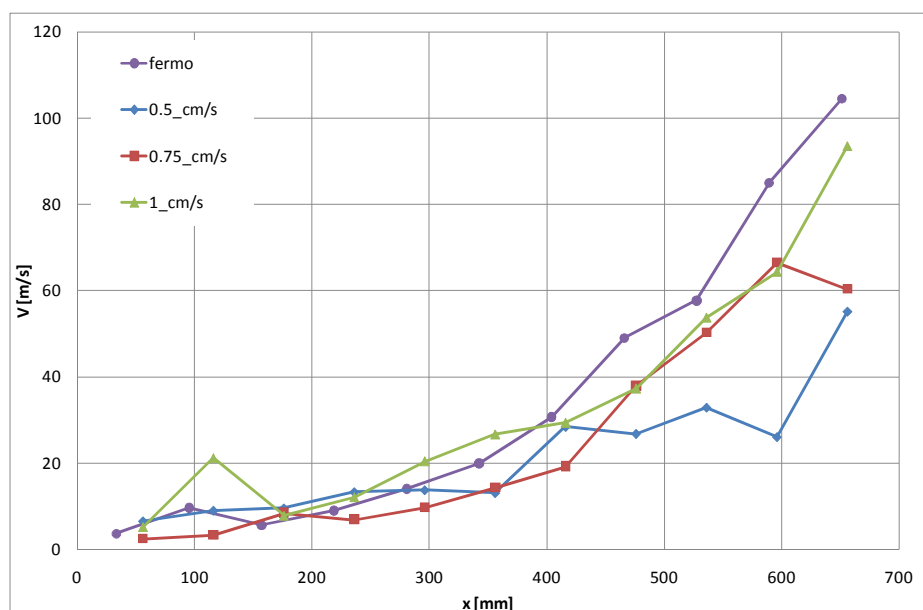


Figura 4.40 - La velocità di penetrazione per velocità di traslazione di 0, 0.5, 0.75, 1

Le velocità di penetrazione, come nel caso precedente, sono ottenute ricercando l'istante in cui sono massimi i gradienti di spostamento e dividendo lo spostamento stesso per il tempo.

Il grafico riporta la velocità di penetrazione lungo l'asse del campione per le tre diverse velocità di traslazione utilizzate. L'andamento è del tutto simile al precedente. Si osserva inoltre la riduzione delle velocità di penetrazione all'aumentare della velocità di traslazione e cioè è chiaramente dovuto alla minor tempo di permanenza del getto nella stessa posizione.

4.11 Conclusioni e limitazioni

La sperimentazione presentata mostra la validità della tecnica della ripresa ad alta velocità accoppiata all'analisi PIV per la misura delle deformazioni indotte dal getto d'acqua su una terra, e di come questa può essere utilizzata per la misura della velocità di penetrazione del getto.

La sperimentazione è stata condotta su un unico tipo di terreno, ma in un ampio capo di condizioni operative, per le quali è stato studiato il profilo della velocità di penetrazione, lungo l'asse del campione stesso, e la sua variazione in funzione delle caratteristiche di generazione del getto.

La forma del profilo della velocità di penetrazione mostra che questa viene dissipata in modo esponenziale, all'avanzare del getto lungo il campione, e che tale dissipazione sia più accentuata se a parità di potenza idraulica, viene privilegiato il contributo della portata rispetto a quello della pressione, ma è da tenersi sempre in conto il fatto che i sistemi ad alta pressione sono molto più complessi tecnologicamente e quindi costosi, rispetto a quelli ad alta portata che sono relativamente più semplici.

5 Lo studio dell'effetto della rototraslazione

5.1 Introduzione

Il getto d'acqua viene utilizzato come mezzo per l'introduzione di sostanze come malte cementizie per il consolidamento e l'impermeabilizzazione dei terreni o come reagenti per la decontaminazione degli stessi.

In tutti i casi la tecnica è quella di inserire in un foro verticale, preventivamente realizzato con tecniche di perforazione meccanica o con lo stesso *waterjet*, una lancia alla cui estremità è posta una testa portaugelli da ciascuno dei quali fuoriesce un getto.

Attraverso la colposizione dei moti di rotazione e traslazione assiale ciascun ugello viene animato di moto elicoidale: la componente rotatoria del moto fa sì che il getto raggiunga i punti disposti su un arco di 360° mentre la componente di traslazione consente, ad ogni rotazione dell'ugello, di trattare fette di terreno sovrapposte. Viene interessato così un volume di terreno avente forma di cilindro con asse verticale.

Il trattamento di un assegnato volume di terreno è ottenuto attraverso la realizzazione di una griglia di colonne verticali. La dimensione del lato della griglia (distanza fra due colonne successive) appare uno dei parametri fondamentali della metodologia di intervento ed è legata alla distanza alla quale il trattamento sia ancora soddisfacente.

La ricerca deve, dunque, essere indirizzata verso lo studio sperimentale delle leggi che legano il raggio della colonna di materiale trattato ai parametri operativi della tecnologia *waterjet* ossia:

1. pressione del getto;
2. numero e diametro degli ugelli;
3. portata del singolo getto e complessiva;
4. distanza di impatto (*stand - off distance*);
5. velocità di roto-traslazione della lancia;
6. passo dell'elica (definita dai parametri precedenti);
7. direzione del getto.

La combinazione ottimale di questi parametri, ai fini dell'ottenimento di elevati valori del raggio della colonna di materiale elaborato ed il raggiungimento di elevati valori della permeabilità finale (indice di efficienza dell'operazione di trattamento), è condizionata dalle caratteristiche del materiale ed in particolare dalla sua granulometria, densità, resistenza meccanica, composizione mineralogica, porosità e contenuto d'acqua (Yoshida, Shibazaki, Kubo, Jimbo, & Sakakibara, 1989).

Lo studio di queste relazioni è stato condotto in laboratorio.

5.2 L'apparato sperimentale

Il sistema *waterjet* impiegato per le prove sperimentali è del tipo a getti continui, trascurando le oscillazioni di pressione della pompa a pistoni contenute nel limite del 2:

Il sistema è costituito fondamentalmente da una lancia mobile collegata alla pompa di pressurizzazione e ad un portale di sostegno all'interno del quale viene alloggiato il campione di terreno da trattare.

La trasformazione dell'energia di pressione in energia cinetica si realizza attraverso due ugelli con orifizio di zaffiro aventi diametro pari a 1 mm, contrapposti e perpendicolari all'asse di rotazione della lancia.

La lancia è collegata al sistema di movimentazione dotato di due motori elettrici, che consentono la traslazione verticale e la rotazione. La loro velocità di rotazione è regolata e controllata tramite convertitori di frequenza installati nel quadro di comando.

Il sistema di pressurizzazione è costituito dalla stessa pompa a pistoncini utilizzata negli esperimenti eseguiti per la misura della velocità di penetrazione, capace di erogare una portata di oltre 50 l/min alla pressione massima di 250 MPa.

5.2.1 Il sistema di preparazione del campione

Il suolo da sottoporre alle prove sperimentali è stato raccolto e compattato per strati in contenitori cilindrici di diametro 76 cm e altezza 30 cm, del peso di circa 75 kg.

A tal fine, dal punto di vista operativo, è stata adottata la seguente procedura ciclica:

- 1 Selezione e pesatura del materiale
- 2 Eventuale aggiunta d'acqua e omogeneizzazione con betoniera
- 3 Carico del materiale nel porta-campioni
- 4 Compattazione tramite pistone idraulico
- 5 Carotaggio per la creazione del foro di introduzione della lancia *waterjet*

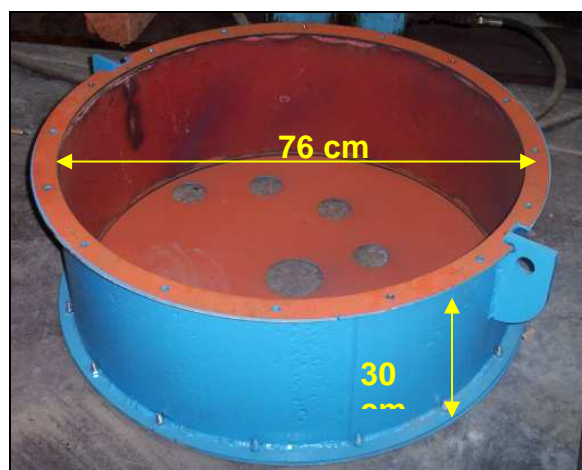


Figura 5.1 - Il contenitore portacampione

5.2.1.1 Il sistema di omogeneizzazione

Il sistema di omogeneizzazione è costituito da una betoniera a bicchiere dotata di motore elettrico a trasmissione silenziata, le cui caratteristiche tecniche sono riportate nella tabella seguente (Tabella 5.1):

Tabella 5.1- Caratteristiche tecniche della betoniera

Caratteristiche tecniche della betoniera	
Capacità totale bicchiere	305 l
Capacità di mescolamento (circa)	260 l
Potenza motore elettrico	1,5 hp - 1,1 kW
Peso approssimativo con motore elettrico	200 kg
Lunghezza (circa)	1950 mm
Altezza (bicchiere rovesciato) (circa)	1500 mm
Larghezza (circa)	1000 mm



Figura 5.2 - Omogeneizzazione del materiale

5.2.1.2 Il sistema di compattazione

Il sistema di compattazione (Figura 5.3) è costituito da un pistone idraulico con una corsa utile di 1000 mm, governato da una centralina idraulica che consente di variare il carico fino al valore massimo di 100 t.

Lo stelo agisce una piastra che distribuisce il carico sul campione, fino a una pressione massima di circa 2.5 MPa.

Il pistone è costituito da un involucro cilindrico esterno di diametro 250 mm, sul quale scorre uno stelo d'acciaio pieno di diametro 145 mm; è dotato di una flangia superiore ed una inferiore, e ciò determina un ingombro massimo trasversale di 330 mm; ha una corsa utile di 1000 mm, e in posizione chiusa è lungo 1820 mm.

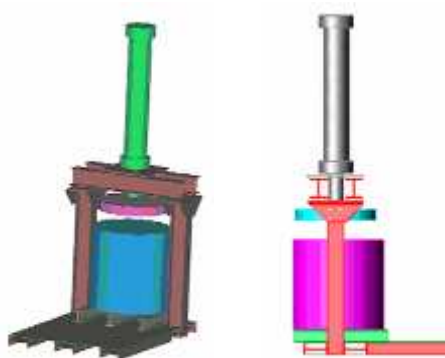


Figura 5.3 – Schema del sistema di consolidazione del campione

Esso è governato da una centralina idraulica da 9 kW, che consente di variare il carico esercitato attraverso una valvola di regolazione della portata dell'olio fino al valore massimo di 100 tonnellate; il sistema permette di ottenere forze verticali variabili che possono simulare le diverse condizioni geotecniche riscontrabili nei terreni *in situ*.

Lo stelo può muoversi in maniera bidirezionale, e ciò facilita le operazioni di carico del materiale all'interno del contenitore. All'estremità inferiore dello stelo è stata applicata una piastra di carico da 30 mm di spessore e 720 mm di diametro.

Il corpo del pistone è fissato ad una struttura di supporto e sostegno metallica (portale), progettata per resistere alle notevoli sollecitazioni richieste in fase di compattazione, composta da profilati tipo HEB 160, uniti tra loro mediante saldatura e bullonatura.

Poiché il pistone si muove verticalmente, dall'alto verso il basso, la sollecitazione critica avviene per trazione in corrispondenza del punto di unione tra la piastra di giunzione, i profilati orizzontali superiori e il pistone.

Tali elementi sono uniti tra loro attraverso bulloni passanti da 30 mm, che garantiscono una resistenza alla trazione ben superiore al limite massimo raggiungibile dal sistema.

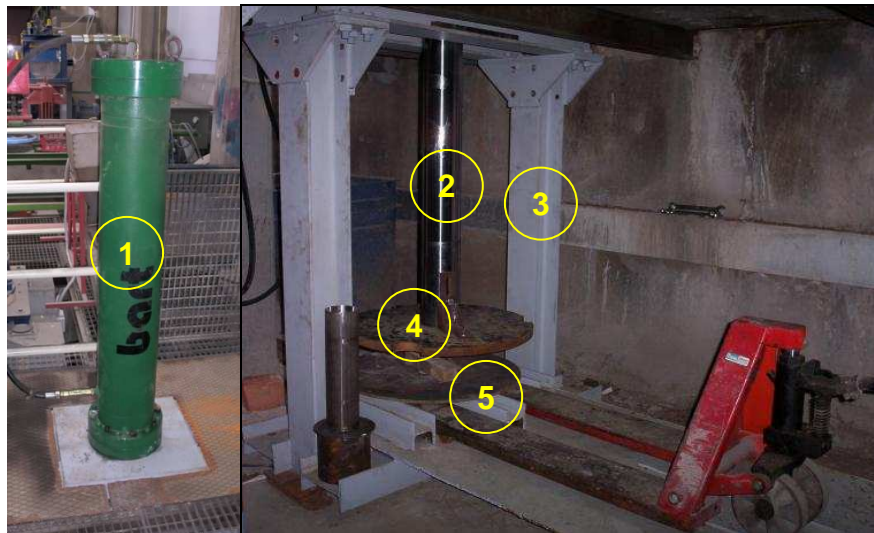


Figura 5.4 - Sistema di compattazione: 1)Pistone idraulico 2) Portale di sostegno; 3) Pistone; 4) Piastra di carico; 5) Piastra di fondo; 5) Transpallet

La fase di compattazione viene considerata conclusa quando i cedimenti del provino, misurati in continuo, con un comparatore centesimale si esauriscono. Ad avvenuta compattazione la piastra di spinta viene bloccata al porta campioni in modo da garantire la conservazione delle condizioni tensionali prescelte per la prova.



Figura 5.5 - Compattazione in corso - in evidenza il comparatore

A compattazione avvenuta, si è provveduto all'applicazione di una piastra di tenuta Figura 5.6 dotata di bulloni e forcelle per il fissaggio al porta - campioni, in modo da contrastare la tendenza del terreno a rigonfiarsi dopo la cessazione del carico.



Figura 5.6 - Portacampione in evidenza la piastra superiore di tenuta

Il pistone è stato utilizzato anche come carotiere (Figura 5.7), semplicemente smontando la piastra di carico e fissando allo stelo un apposito utensile in grado di estrarre dal campione di terreno una «carota» del diametro di circa 10 cm.

In questo modo, subito dopo la compattazione, è stato possibile effettuare dei sondaggi immediati per verificare il grado di compattazione dei diversi strati.

Il foro realizzato mediante il carotiere consente inoltre il successivo inserimento della lancia *waterjet* per effettuare la prova col getto d'acqua, procedendo dal basso verso l'alto.

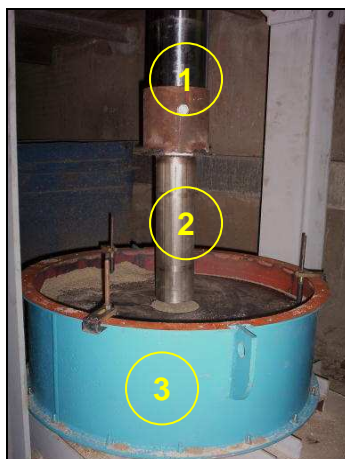


Figura 5.7 - Le operazioni di carotaggio: 1) Pistone; 2) Carotiere; 3) Piastra di tenuta

5.2.2 Il portale di sostegno

La lancia *waterjet* è sostenuta da un portale (Figura 5.8 e Figura 5.9), realizzato con scatolari e piastre di ferro, ha la funzione di sostenere il sistema porta lancia e l'organo che consente la movimentazione del contenitore entro il quale viene posto il terreno da sottoporre alla prova. L'organo si muove su un binario costituito da un profilato IPE 120, e consente di calare il cilindro porta - campioni all'interno di un apposito alloggiamento a fossa, per consentire lo svolgimento delle prove in condizioni di sicurezza, lontano dagli operatori.

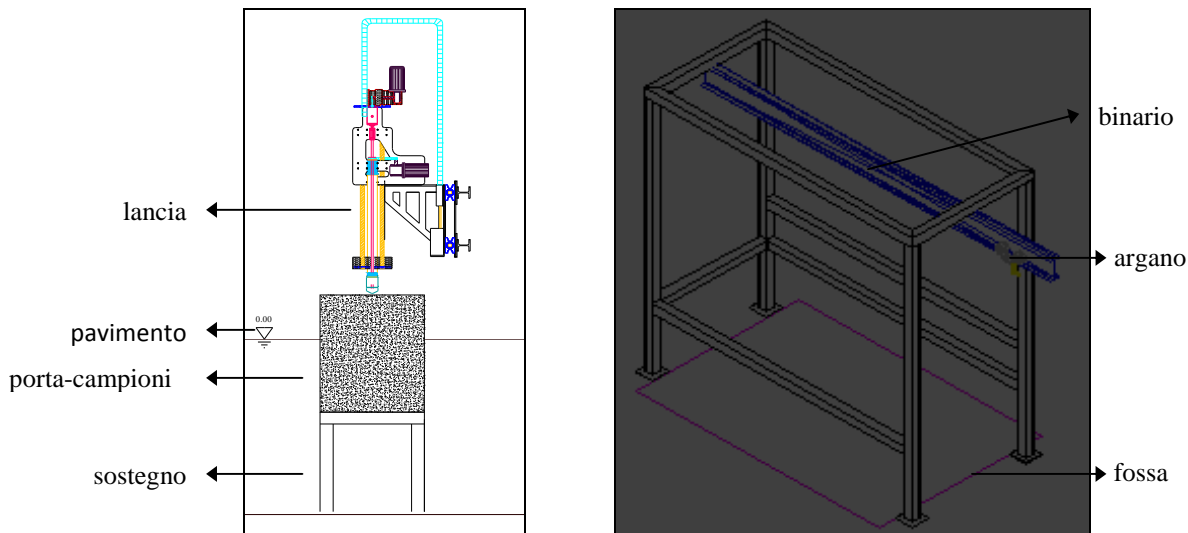


Figura 5.8 - Disegno costruttivo d'insieme e portale di sostegno

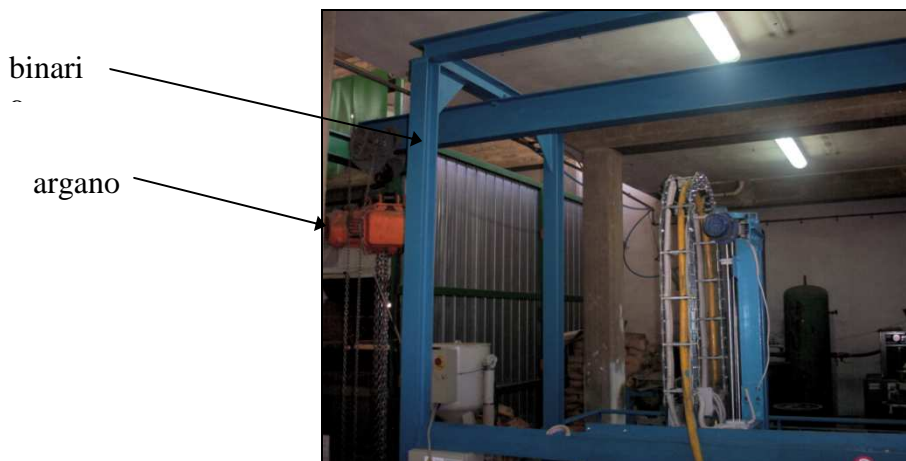


Figura 5.9 – Il portale di sostegno

5.2.3 Il sistema porta-lancia

Il sistema di sostegno e guida della lancia (Figura 5.10) è realizzato essenzialmente per mezzo di lastre di acciaio di spessore variabile tra i 2 e i 4 mm. Esso è fissato al portale tramite una mensola triangolare dotata di cuscinetti, e quindi libera di traslare orizzontalmente.

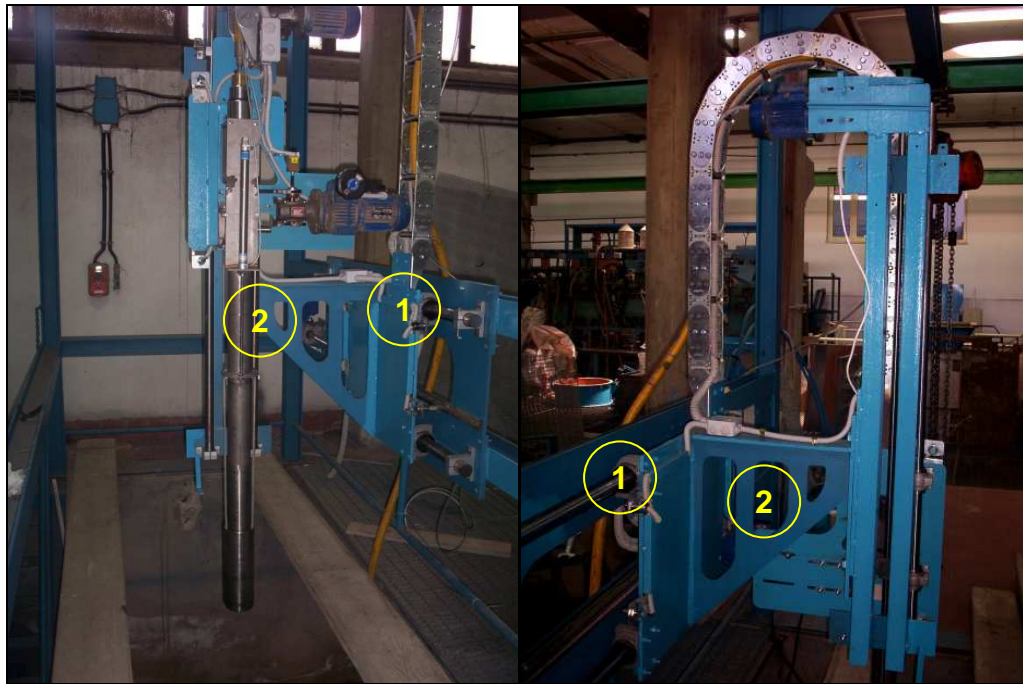
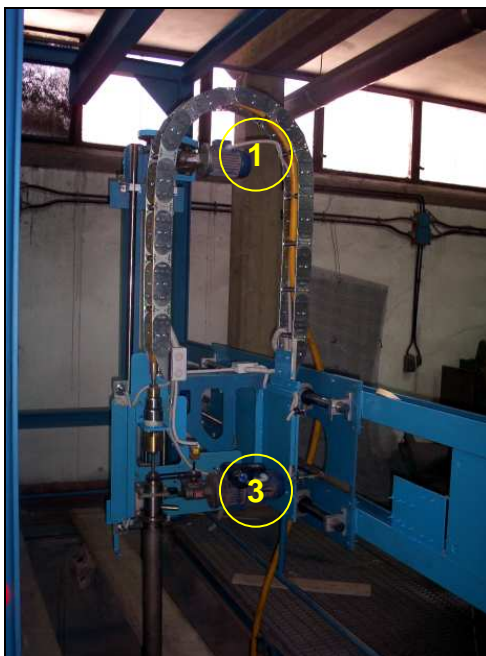


Figura 5.10 - Il sistema porta - lancia: vista anteriore e vista posteriore 1) cuscinetti; 2) mensola triangolare

Il sistema è dotato di tre motori elettrici, che consentono tre tipi di movimento:

- Traslazione orizzontale
- Traslazione verticale
- Rotazione della lancia

Il controllo dei movimenti e delle velocità di traslazione e rotazione è affidato ad un apposito quadro elettronico di controllo (Figura 5.12).



1) motore traslazione verticale

2) motore traslazione orizzontale

3) motore rotazione lancia

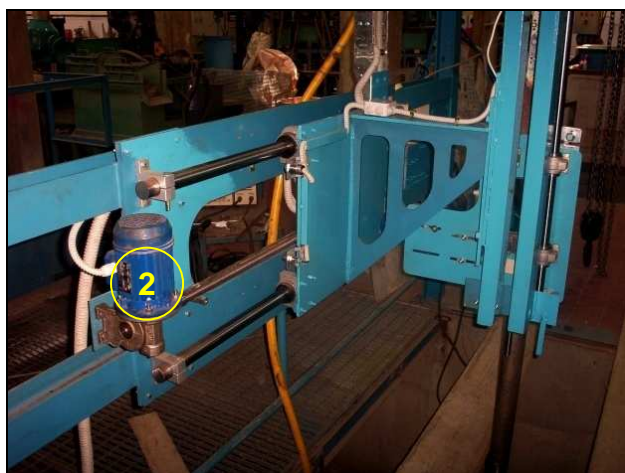


Figura 5.11 - Particolari del sistema di movimento



Figura 5.12 - Il quadro elettronico di controllo

5.2.4 La lancia *waterjet*

La lancia *waterjet* è il cuore dell'intero sistema. Essa è in grado di svolgere quattro funzioni diverse, a seconda delle esigenze sperimentali:

- produzione di getti d'acqua ad alta pressione, attraverso i quattro ugelli di cui è dotata. Due di essi sono disposti normalmente rispetto all'asse di rotazione della lancia e hanno il compito di elaborare lateralmente il terreno attraversato mentre gli altri due sono obliqui con un angoli di circa 25° rispetto all'asse della lancia e hanno il compito di scavare frontalmente il terreno per consentire la penetrazione della lancia anche in assenza del foro preliminare. Attraverso l'impiego di opportuni occlusori degli orifizi di uscita dell'acqua, è possibile utilizzare gli ugelli separatamente o contemporaneamente.
- Immissione di aria compressa per la produzione di bolle attraverso ugelli secondari opportunamente disposti immediatamente a valle di ciascuno dei due orifizi diametrali: il flusso di bolle d'aria viene trascinato dall'azione dinamica del getto d'acqua e contribuisce ad facilitare la penetrazione del getto riducendo la resistenza incontrata.
- Immissione di additivi e reagenti nel getto d'acqua sia per aumentare la coerenza del getto stesso (con polimeri solubili a lunga catena dosati e premiscelati all'acqua a monte della pompa primaria, sia per scopi di risanamento (composti chimici neutralizzanti in caso di suoli acidi o basici, sostanze fissatrici di metalli per bloccarne la diffusione).
- Aspirazione dell'acqua in eccesso e/o del fango di particelle fini in sospensione separate dall'azione selettiva del getto durante l'operazione di elaborazione del terreno. Lo scopo è quello di evitare l'accumulo progressivo di acqua nella zona di trattamento con la conseguenza di ostacolare lo svolgimento dell'operazione o quello di eliminare le particelle fini alle quali sono spesso legati i contaminanti (idrocarburi, metalli pesanti).

5.2.4.1 Gli ugelli

La trasformazione dell'energia di pressione dell'acqua in energia cinetica si realizza attraverso gli ugelli, costituiti da materiali molto duri e resistenti (widia, corindone, diamante, zaffiro), aventi diametro compreso tra 0.1 e 1.5 mm.

Il disegno accurato di un ugello è condizione necessaria per realizzare un'efficace azione di taglio, e dipende ovviamente dalla destinazione per cui esso è progettato: ad esempio, per

operazioni di pulizia, l'ugello deve essere tale da permettere l'apertura del getto subito dopo l'uscita dall'orifizio, mentre per un'apparecchiatura di taglio esso deve garantire l'effetto contrario, cioè la coerenza del getto alla massima distanza possibile.

Gli ugelli sono le sole parti di un sistema *waterjet* soggette ad usura, a causa della presenza di particelle solide sospese nell'acqua; per attenuare tale effetto, l'acqua deve essere sottoposta a trattamenti preliminari di riduzione della durezza e di filtrazione anche in più stadi.

Nel corso della sperimentazione sono stati impiegati due ugelli di diametro pari a 1 mm disposti perpendicolarmente rispetto all'asse di rotazione della lancia.

5.2.4.2 La testa

Gli ugelli sono contenuti nella testa della lancia, di cui in Figura 5.13 è riportato il disegno costruttivo della, in cui sono indicati gli ugelli (n. 1), l'orifizio di immissione dell'aria (n. 2) ed il sistema di protezione della lancia dall'ingresso di acqua e fango. Quest'ultimo è realizzato con un tubo (n. 4, verde) all'interno del quale la lancia è libera di ruotare attorno al proprio asse, un paraolio (n. 4, giallo) ed un sistema di cuscinetti stagni.

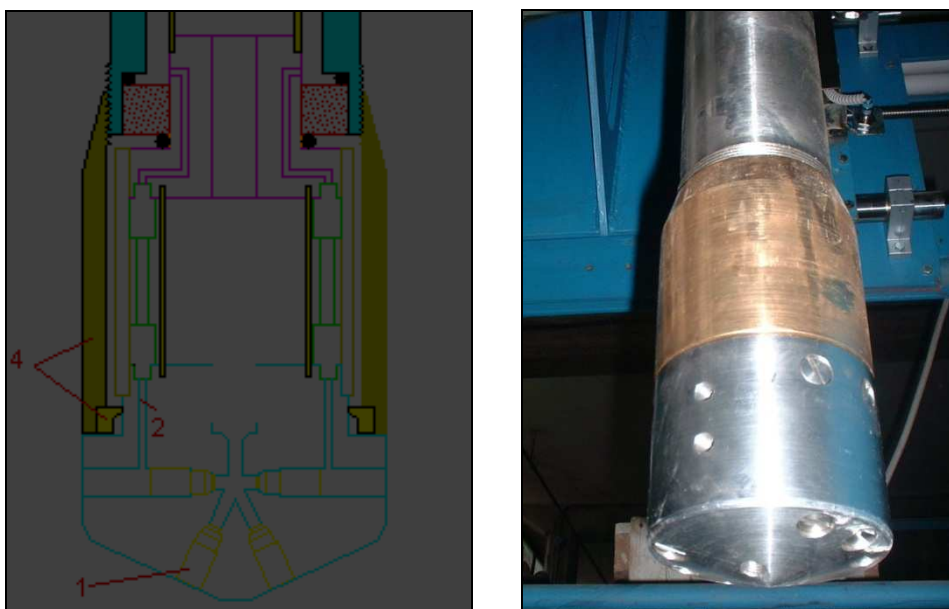


Figura 5.13 - La testa portaugelli

Alla parte superiore della struttura è connesso uno *swivel* (giunto rotante), nel quale trova posto l'attacco per la connessione con il tubo flessibile che porta l'acqua ad alta pressione dal sistema principale di pressurizzazione verso gli ugelli (Figura 5.14).



Figura 5.14 - Particolari della lancia 1) connessione tra il tubo flessibile e la lancia; 2) giunto rotante (swivel)

5.2.5 Il sistema di otturazione del getto

La lancia è inoltre dotata di un sistema ad azionamento pneumatico che consente di confinare il getto dal momento in cui si avvia la macchina fino all'istante di inizio della prova sul campione di terreno, così che il sistema possa raggiungere la pressione di regime senza che l'acqua precedentemente fuoriuscita possa alterare le condizioni iniziali del campione sottoposto al trattamento.

Tale sistema è costituito da un pistone pneumatico, governato da un'apposita valvola, che permette la traslazione verticale di un cilindro che avvolge completamente la testa portaugelli, intercettando il getto all'interno del cilindro porta-campioni prima dell'effettivo inizio della prova.

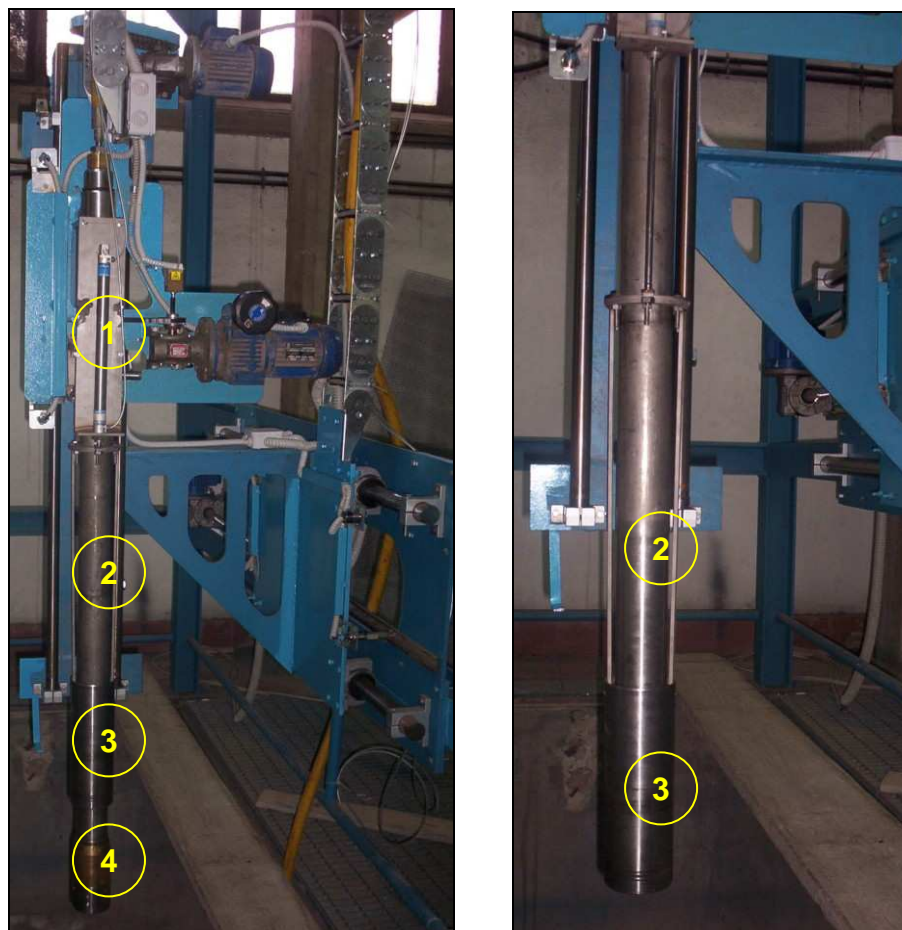


Figura 5.15 - Il sistema di chiusura del getto: aperto (a sinistra); chiuso (a destra) 1) pistone; 2) aste di collegamento; 3) cilindro di chiusura; 4) testa portaugelli

5.3 La sequenza operativa

La sequenza operativa è quindi stata caratterizzata dalle fasi seguenti:

- 1 Preparazione del campione;
 - 1.2 selezione e pesatura del materiale;
 - 1.3 omogeneizzazione;
 - 1.4 carico, compattazione e carotaggio;
- 2 Trattamento con lancia *waterjet*;
- 3 Verifica post – trattamento;
 - 3.2 analisi granulometriche;
 - 3.3 analisi del contenuto d'acqua.

5.4 Il materiale

Le prove sperimentali sono state condotte su campioni costituiti da sabbia (Figura 5.16), su cui sono state eseguite analisi granulometriche, test edometrici, prove di permeabilità.

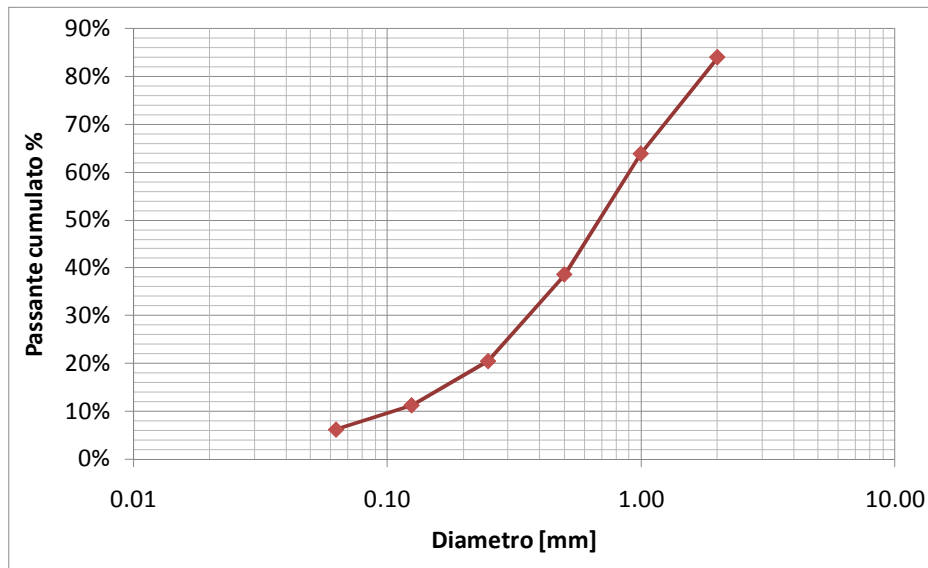


Figura 5.16 - Curva granulometrica della sabbia per i campioni

Il coefficiente di consolidazione è pari a $8 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, il coefficiente di compressibilità volumetrica è $4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kg}$ e la conducibilità idraulica è pari a $3 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$. I campioni di terreno, ciascuno con massa totale pari a 75 kg sono stati raccolti e compattati per strati, in contenitori cilindrici di diametro 76 cm e altezza 30 cm.

5.5 Studio della forma del getto in aria

Le prove di collaudo e messa a punto della lancia *waterjet* hanno compreso anche lo studio della forma del getto in aria.

A questo scopo, la lancia è stata equipaggiata con due ugelli del diametro di 1 mm, installati negli alloggiamenti ad asse orizzontale, mentre i restanti due alloggiamenti (ad asse obliquo) sono stati opportunamente occlusi.

E' stata quindi condotta una serie di prove a diverse pressioni: 20, 40, 60, 80 e 100 MPa, al fine di verificare la coerenza del getto ed individuarne le caratteristiche geometriche fondamentali.

Dalle immagini (Figura 5.17) si può notare come il getto tenda a sfrangiarsi in maniera apprezzabile alla distanza di circa 2 - 3 cm dall'ugello.

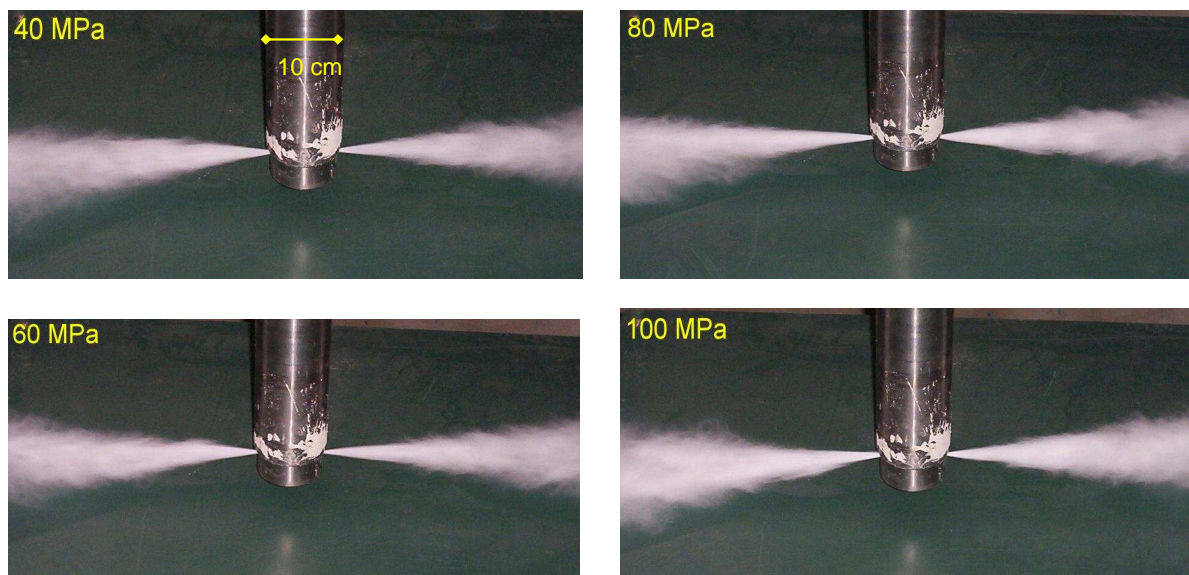


Figura 5.17 - Lo studio del getto in aria

5.6 Il modello geometrico del movimento dell'ugello

Il trattamento del suolo avviene inserendo la lancia nel foro cilindrico realizzato preventivamente al centro del campione al termine della fase di compattazione. Raggiunta la posizione di partenza, viene avviata la prova, conferendo alla testa porta – ugelli due moti:

- 1 rotazione attorno all'asse della lancia, caratterizzato dalla velocità angolare ω ;
- 2 traslazione in direzione verticale, caratterizzato dalla velocità assiale $v_{Assiale}$.

Durante questo moto di rot –traslazione il getto d'acqua agisce sul terreno fino alla distanza r dall'asse del foro e per uno spessore d (Figura 5.18).

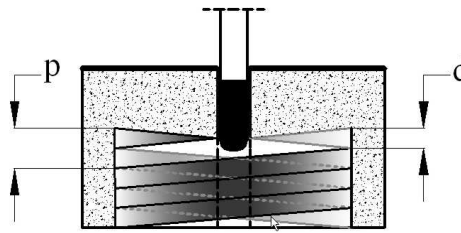


Figura 5.18 - Geometria del getto d'acqua

Nell'intervallo di tempo da $t=0$ a $t=T$ un ugello compie un giro completo (2π) e percorre una lunghezza assiale (p), descrivendo una superficie elicoidale. Lo spazio percorso in direzione assiale è dato da:

$$p = T \cdot v_{Assiale} \quad (5.1)$$

Supponendo che i getti d'acqua si mantengano coerenti, senza sfrangiarsi eccessivamente prima dell'impatto con il terreno, il volume complessivamente trattato è assimilabile a quello di un cilindro.

Il volume descritto (V_T) in un giro (periodo T) sarà pertanto:

$$V_T = \pi r^2 \cdot p = \pi r^2 \cdot T \cdot v_{Assiale} \quad (5.2)$$

Affinché tutto il volume descritto venga trattato da un unico passaggio del getto è necessario che la velocità assiale e la velocità angolare (ω) siano dipendenti; ovvero che il passo dell'elica sia pari allo spessore ($2d$) della zona trattata:

$$p = 2d \quad (5.3)$$

da cui si ricava il legame fra la velocità angolare, quella assiale e lo spessore della zona trattata:

$$v_{Assiale} = \frac{2d}{T} = \frac{2d \cdot \omega}{2\pi} \Rightarrow v_{Assiale} = \frac{d \cdot \omega}{\pi} \quad (5.4)$$

Il volume trattato (V_T) in un periodo (T) può essere espresso anche in funzione della velocità angolare:

$$V_T = \pi r^2 \cdot T \cdot v_{Assiale} = r^2 \cdot T \cdot d \cdot \omega \quad (5.5)$$

Il volume trattato (V_t) nell'unità di tempo è invece espresso dall'equazione:

$$V_t = \pi r^2 \cdot v_{Assiale} = r^2 \cdot d \cdot \omega \quad (5.6)$$

Nel caso di due ugelli contrapposti le relazioni precedenti diventano:

$$v_{Assiale} = \frac{2d \cdot \omega}{\pi}$$

$$V_r = 2r^2 \cdot T \cdot d \cdot \omega$$

$$V_t = 2r^2 \cdot d \cdot \omega$$
(5.7)

Perciò, fissate la velocità angolare ω o la velocità assiale ($v_{Assiale}$) ed imponendo la profondità di trattamento (h) multiplo di d , si ricava la durata totale della prova (t):

$$t = \frac{h}{v_{Assiale}}$$
(5.8)

Il raggio d'influenza r è quindi legato alla velocità assiale $v_{Assiale}$ e alla velocità angolare ω che, opportunamente composte, forniscono la velocità di percorrenza dell'elica e quindi il tempo di permanenza del getto nel terreno da trattare:

$$r = f(v_{Assiale}, \omega) = g(t)$$
(5.9)

La forma di queste funzioni dipende come detto non solo dalla velocità di moto del getto, ma anche dagli altri parametri operativi del sistema *waterjet* (pressione, portata, distanza e direzione d'impatto) e dalle caratteristiche del terreno.

L'obiettivo della sperimentazione è quindi quello di determinare tali relazioni e di mostrare quali siano le condizioni in cui la tecnologia risulta maggiormente efficace.

5.7 Le prove e i risultati

Le prove sono state effettuate, come detto in precedenza, mantenendo costanti i parametri operativi riassunti in Tabella 5.2.

Tabella 5.2 - Parametri operativi utilizzati

Pressione [MPa]	Diametro ugello [mm]	Coefficiente di contrazione c_d [mm]	Vel. del getto [m/s]	Portata (2 ugelli) [l/min]	Potenza idraulica [kW]
40	1.0	0.63	274.8	16.2	10.88

Durante lo studio dello sfrangiamento del getto d'acqua in aria (Figura 5.17) è stato osservato che il diametro del getto a circa 10 cm di distanza dall'ugello è circa 1.5 cm. Le prove sono state dunque eseguite mantenendo costante la traiettoria del getto su un elica con passo 3 cm, sufficientemente piccolo perché tutto il materiale venga interessato dal passaggio di uno dei due ugelli montati sulla testa della lancia.

Sono state eseguite dieci prove su campioni aventi stesso materiale e stessa di compattazione pari a 0.8 MPa, divise in 2 batterie, la prima in condizioni secche e la seconda in condizioni di saturazione

I campioni, di circa 150 . kg di peso, avevano un' altezza di circa 20 cm, e sono stati trattati per circa 27 cm di altezza per evitare l'influenza delle interfacce tra il suolo e le piastre superiore e inferiore del portacampione.

La massa volumica secca dei campioni compattati è compresa tra 1,7 e 1,8 gr/cm³.



Figura 5.19 – L'esecuzione della prova.

Le prove cinque prove delle due batterie sono state eseguite con i parametri mostrati in Tabella 5.3.

Tabella 5.3 - Parametri operativi della sperimentazione

Campione	1	2	3	4	5
Volume d'acqua utilizzato [l]	9,79	3,81	14,69	11,15	10,88
Durata prova [s]	36	14	54	41	40
Velocità angolare [giri/min]	5	10	3	4	3,5
Velocità assiale [cm/s]	0,3	0,52	0,16	0,42	0,37
Velocità assoluta dell'ugello [cm/s]	2,4	4,8	1,4	1,9	1,7

Al termine delle prove è stato misurato il raggio di influenza del getto, sono state effettuate le analisi granulometriche per la determinazione della sua eventuale variazione ed è stato misurato il contenuto d'acqua a diverse distanze dal centro del campione.



Figura 5.20 - Campioni trattati

5.7.1 Il raggio di influenza

Figura 5.21 sintetizza la variazione del raggio d'azione del getto d'acqua (e quindi del volume trattato) in funzione delle velocità di roto – traslazione della lancia. Come atteso, si ha la riduzione del raggio d'influenza con l'aumentare della velocità. I valori del raggio di influenza variano fra 23 cm e 36 cm nel suolo secco, e hanno un valore tra 19 cm e 27 cm nel suolo saturo. Si osserva quindi un raddoppio delle prestazioni nel passaggio tra da materiale saturo a quello secco.

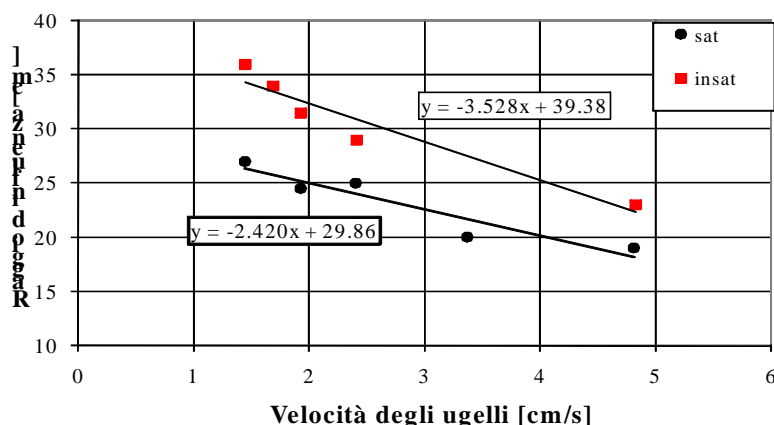


Figura 5.21- Raggio d'influenza in funzione della velocità assoluta di percorrenza dell'elica

5.7.2 Energia specifica e volume trattato nell'unità di tempo

Nel diagramma di sinistra della Figura 5.22 viene presentato l'andamento del volume trattato nell'unità di tempo in funzione della velocità totale, mentre a destra viene presentato l'andamento dell'energia specifica. L'energia specifica (E_s) è definita come:

$$E_s = \frac{W}{V_t} = \frac{p \cdot Q}{V_t} \quad (5.9)$$

dove W è la potenza, V_t è il volume trattato nell'unità di tempo, p e Q sono rispettivamente la pressione di generazione e la portata del getto d'acqua.

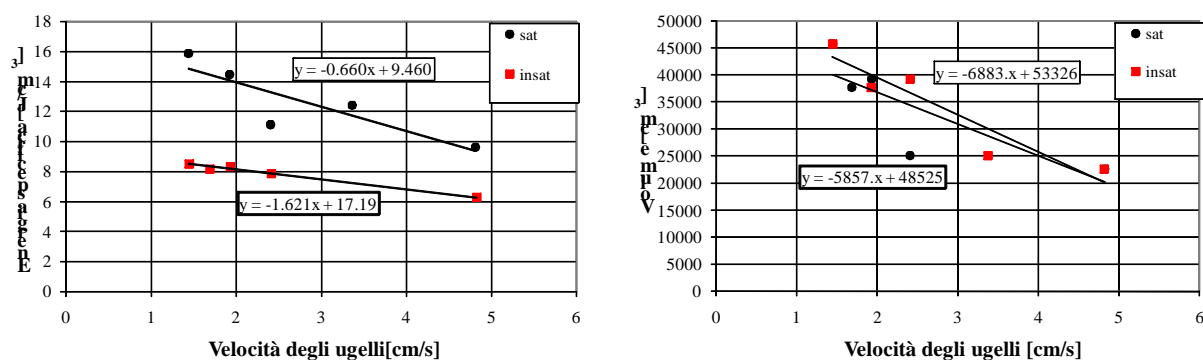


Figura 5.22 – Energia specifica (sinistra) e volume trattato (destra) in funzione della velocità totale.

La riduzione dell'energia specifica all'aumentare della velocità totale è attribuibile principalmente al minor tempo di permanenza del getto in un assegnato volume. Inoltre l'energia richiesta per il trattamento dei volumi che si trovano vicino all'ugello è minore di quella richiesta per i volumi situati alla periferia del campione a causa della resistenza dovuta al materiale interposto. In altri termini il volume prossimo al centro viene investito da tutta l'energia del getto, mentre quello posto a maggiore distanza lungo il raggio viene investito da un getto la cui energia è ridotta per effetto delle resistenze indotte dalla torbida interposta. Durante le prove "lente" il volume centrale del campione viene "sovra-trattato" ma parte dell'energia del getto raggiunge volumi più lontani. Nelle prove veloci l'energia viene bene impiegata perchè il volume centrale del campione non viene "sovra-trattato" ma non viene introdotta energia disponibile per il raggiungimento dei volumi più lontani.

Un miglioramento dell'efficienza del trattamento e contemporaneamente del raggio di influenza potrebbe essere ottenuta associando le alte velocità totali alla ripetizione della traiettoria oppure a passi dell'elica ridotti.

5.7.3 Contenuto d'acqua

L'analisi del contenuto d'acqua dei campioni prima e dopo il trattamento, è stato eseguito solo per le cinque prove eseguite sui campioni secchi, ed ha confermato le misure del raggio di influenza eseguite valutando qualitativamente la posizione del confine fra terreno trattato e non trattato.

In Figura 5.23 viene mostrata la variazione media del contenuto d'acqua in relazione alle condizioni del terreno prima del trattamento con *waterjet* a diversi raggi di influenza.

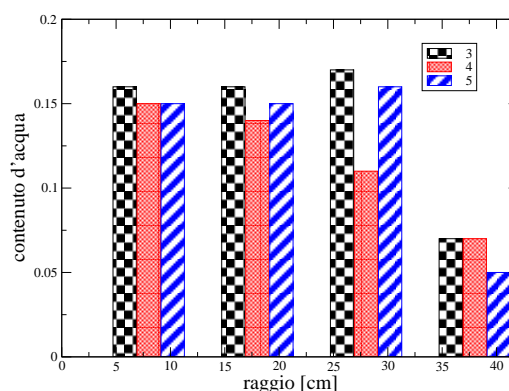


Figura 5.23 - Umidità in funzione del raggio di influenza

E' interessante notare che l'azione del getto d'acqua lungo il raggio termina bruscamente ossia il confine fra la zona trattata e quella non trattata è rappresentato da una corona circolare il cui spessore è molto piccolo (minore di 1 cm). Il terreno esterno alla volume trattato dal getto d'acqua appare indisturbato.

5.7.4 Analisi granulometrica post-trattamento

Le analisi granulometriche post-trattamento sono state effettuate su tutti i campioni e i risultati delle analisi post-trattamento, sono stati messi a confronto con la curva granulometrica del terreno originale. In Figura 5.24 i risultati delle due prove estreme (raggio d'azione più basso e più alto) della batteria eseguita sul suolo secco a diverse distanze dal centro. Tale risultato è ritenuto rappresentativo di tutte le prove.

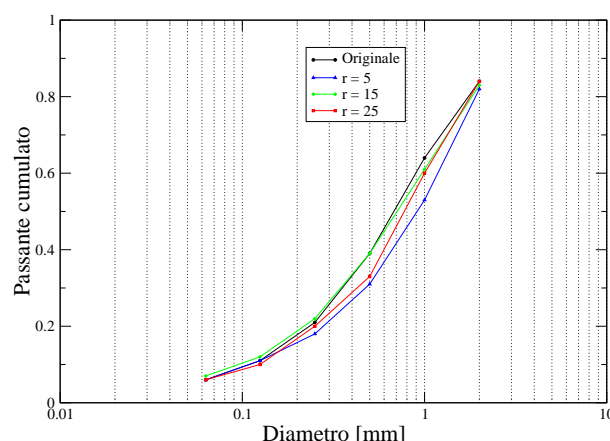


Figura 5.24 – Granulometria pre e post trattamento dei campioni 2 e 3

Entrambe le analisi dimostrano che il trattamento con getto d'acqua non ha effettuato una rimozione selettiva del materiale: ciò dipende indubbiamente dal fatto che l'estrazione del materiale asportato dall'acqua durante il trattamento stata realizzata per gravità attraverso il foro situato sul fondo del porta-campioni. Un sistema più adatto per la raccolta del terreno elaborato dal sistema *waterjet* conforme alla situazione reale di trattamento in situ, dovrebbe prevedere l'aspirazione della torbida attraverso un apposito circuito. Questo verrà realizzato o aspirando o premendo il fango per mezzo di una pompa attraverso un'apposita intercapedine all'interno della lancia (Figura 5.25).

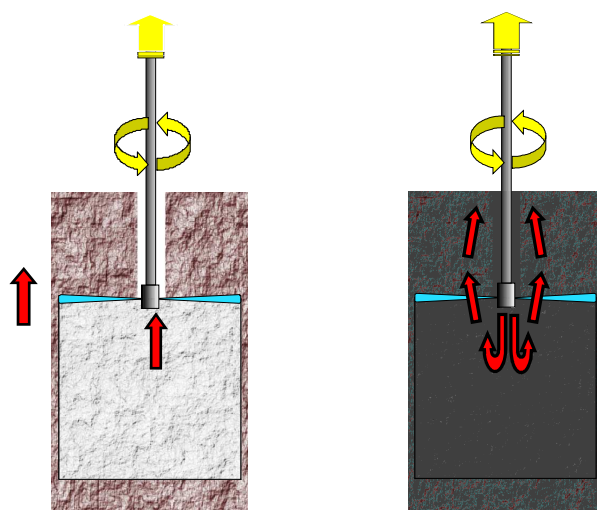


Figura 5.25 - Schema di aspirazione (sinistra) e di pompaggio (destra)

5.8 Conclusioni, limitazioni e sviluppi futuri

La sperimentazione presentata ha dimostrato che, in una sabbia avente massa volumica pari a $1,7 \text{ kN/m}^3$, i getti generati con ugelli di diametro 1 mm e pressione 40 MPa, formano colonne di raggio variabile 23 cm e 36 cm nel suolo secco, e un valore tra 19 cm e 27 cm nel suolo saturo, in funzione della velocità di roto-traslazione della lancia.

La sperimentazione è stata condotta su un unico tipo di terreno, con parametri operativi fissi e con la sola variazione della velocità di roto-traslazione della lancia. Essa sta proseguendo con l'obiettivo di studiare gli effetti dell'aumento della pressione di generazione e della portata dei getti. E' evidente infatti, che l'aumento dell'energia dei getti determina l'incremento del raggio di influenza e un più energico trattamento del terreno ma d'altra pare significa

maggiori costi. Deve pertanto essere ricercata quella condizione ottimale in cui le risorse impegnate determinano il massimo effetto positivo. Inoltre sembra essere promettente la realizzazione di prove con elevata velocità di rotazione e ridotta velocità di traslazione. Per questo motivo un'apposita serie di prove sarà effettuata per esplorare gli effetti del passo dell'elica percorsa dagli ugelli durante il moto.

La sperimentazione ha mostrato una serie di limitazioni dovute essenzialmente a:

- Le grandi dimensioni del campione
- La difficoltà nel campionamento del materiale fangoso (mescolamento)
- La difficile comprensione e misura del moto delle particelle

6 La sperimentazione in situ

6.1 Obiettivo della campagna di indagini

Il piano di lavoro è stata completato da una campagna di sperimentazioni in situ, su scala reale, in cui è stato utilizzato un sistema di getto d'acqua *commerciale*, al fine di verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti in laboratorio, con particolare riferimento ai tempi di esecuzione in funzione dei parametri operativi.

6.2 Il sistema a getto d'acqua

Il sistema utilizzato per la sperimentazione *in situ* (Figura 6.1), è un apparato utilizzato per il *jetgrouting*, costituito da un impianto per la miscelazione di acqua e cemento, da una pompa per tale miscela e di una lancia, alla cui estremità è collocata la testa portaugelli.

La lancia, di diametro 65mm, è montata su un carro cingolato ed è munita di 2 movimenti: rotazione e traslazione. Essa è inoltre fornita di una testa fresante a lame del diametro di 70 mm, per la realizzazione del foro guida per l'iniezione. La lancia è collegata alla pompa mediante una tubazione avente diametro 40mm e lunga circa 40 m.

Ai fini della ricerca in situ, l'attrezzatura descritta è stata utilizzata per l'iniezione della sola acqua.

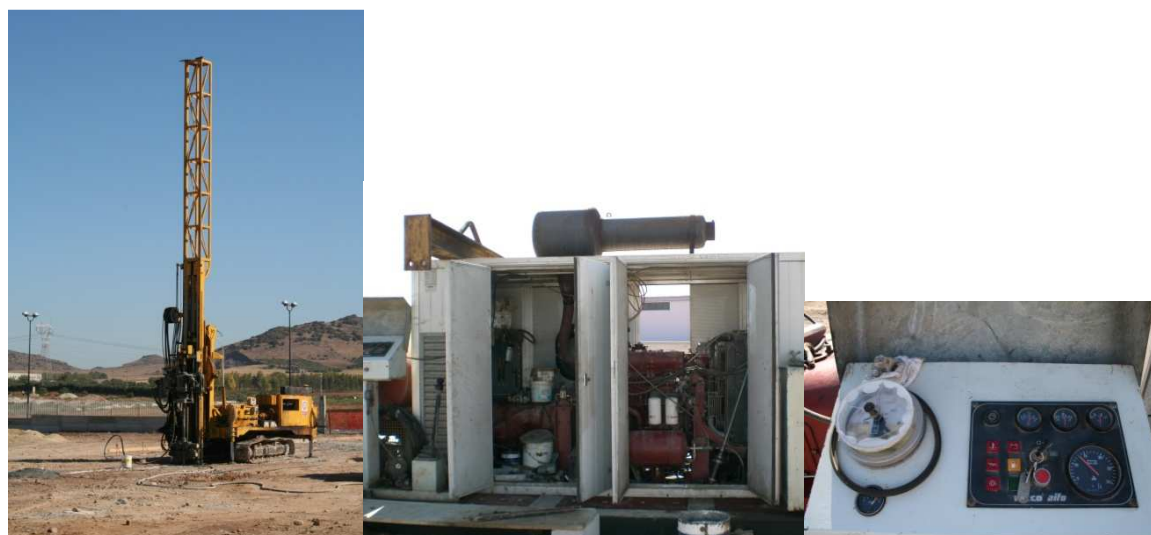


Figura 6.1 - Il sistema di iniezione: il carro con la lancia, la pompa e il quadro di controllo

La pompa è capace di generare pressioni fino a 37 MPa, che sono relativamente basse rispetto a quelle usate per la sperimentazione di laboratorio pur essendo la potenza idraulica sostanzialmente confrontabile nei due casi, descritti nel seguito ed in cui è stata utilizzata la maggiore portata, generata attraverso ugelli di maggiore diametro.

6.3 La testa porta ugelli

La testa della lancia è munita di alloggiamenti per due ugelli orizzontali contrapposti distanti 20 mm l'uno dall'altro in direzione verticale. La testa può montare ugelli di diametro pari 1.8 mm e 2.2 mm.

Alle pressioni di 37 MPa e 27 MPa, con le due serie di ugelli si ottengono le seguenti portate:

• Ugelli da 1.8 mm e pressione	{	37 MPa → Portata	71.5	l/min
		27 MPa → Portata	64.4	l/min
• Ugelli da 2.2 mm e pressione	{	37 MPa → Portata	114.5	l/min
		27 MPa → Portata	86	l/min

Tali portate sono state determinate misurando il volume d'acqua pompato dal sistema per un tempo di 2 minuti.



Figura 6.2 - Particolare della testa portaugelli e del getto in aria

6.4 Il sistema di movimentazione

Il movimento rotatorio per lo scavo del foro e la rotazione della testa porta ugelli, durante la fase di iniezione, è conferito da un motore diesel. La velocità di rotazione è compresa tra 10 giri/min e 60 giri/min. La regolazione avviene variando il numero di giri e il rapporto del motore.



Figura 6.3 – Il sistema di movimento

Il movimento traslatorio è conferito alla lancia da un pistone idraulico che trascina una catena di acciaio a cui è collegata la lancia stessa. Tale movimento è continuo solo per la fase di perforazione mentre è discontinuo ed a scatti di 4 cm, nella fase di risalita e di iniezione. Lo scatto di 4 cm permette di trattare tutto il volume attraversato dalla lancia, dato che gli ugelli sono posizionati, come detto, a 2 cm di distanza l'uno dall'altro.

Questa differenza si ritiene comunque non significativa ai fini del confronto dei risultati.

La velocità di risalita può essere impostata, regolando il valore del tempo in cui avviene lo scatto, che può variare da 1 a 12 secondi.

6.5 Il sito

Il sito prescelto per le prove si trova nella zona industriale di Sestu in località Su Fraigu. Il suolo è stato caratterizzato mediante due sondaggi a recupero di carota (Figura 6.4 e Figura 6.5) e di successive analisi granulometriche, eseguite sui testimoni. Le posizioni dei sondaggi sono mostrate in Figura 6.6.

Sondaggio SA				
Profondità	Stratigrafia	Descrizione	Falda	n° colpi SPT
1.00		Terreno di copertura costituito da terra marnosa, argillosa, giallo bruna		
2.00		Suolo argilloso marron		
2.50		Argilla marron con ciottoli		
3.00		Suolo argilloso marron		
4.00				
4.50				
5.00		Marna argillosa grigio-verde sovraconsolidata		
5.70				
6.00				



Figura 6.4 - Stratigrafia del sondaggio SA

Sondaggio SB				
Profondità	Stratigrafia	Descrizione	Falda	n° colpi SPT
1.00		Terreno di copertura costituito da terra marnosa, argillosa, giallo bruna		
1.20				
2.00		Suolo argilloso scuro con ciottoli di diametro fino 30 mm		
2.50		Argilla marron con ciottoli di dimensione fino a 10 mm		
3.00		Suolo argilloso marron		
4.00				
4.50				
5.00		Argilla marron con ciottoli di dimensione fino a 10 mm		



Figura 6.5 - Stratigrafia del sondaggio SB

Sono state eseguite inoltre tre misure dell'altezza piezometrica della falda in punti la cui posizione è indicata in Figura 6.6, e i cui valori sono:

PZ1 = -3.80 m

PZ2 = -3 m da p.c.

PZ3 = -3.40 da p.c

6.6 Le prove

La campagna è stata composta da 10 prove, di cui 8 eseguite in risalita tra -5 m e -3 m di profondità (Figura 6.7) e 2 seguite eseguite in risalita tra i -2 m di profondità ed il piano di campagna. Le prime hanno interessato la formazione omogenea di argilla bruna immersa in falda mentre il secondo gruppo è stato realizzato nel terreno di copertura al di sopra della falda. stessa

I punti di prova sono stati disposti lungo una linea ed a 2 metri l'uno dall'altro (Figura 6.6). Questa distanza è stata ritenuta sufficiente al garantire la non interferenza tra i test.

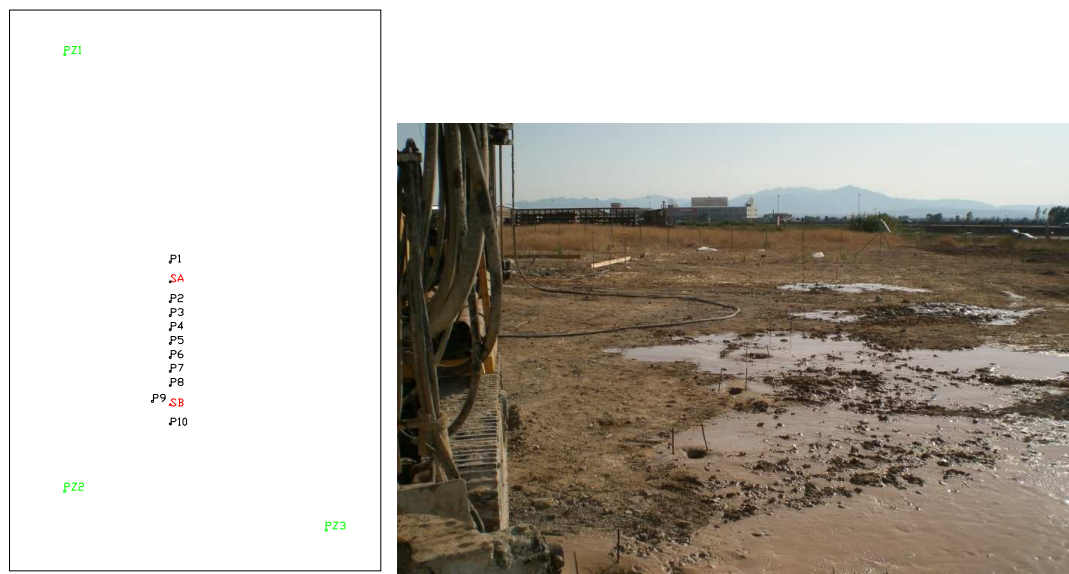


Figura 6.6 - Planimetria e immagine delle posizioni di prova

Le varie prove sono state realizzate facendo variare i parametri operativi del sistema, ossia la pressione, il diametro degli ugelli e la velocità di movimento. Sono stati scelti 2 valori di pressione, 37 MPa (il massimo possibile con la pompa utilizzata) e 27 MPa, 2 valori del diametro degli ugelli (2.2 mm e 1.8 mm) e 2 valori della velocità totale.

Per quanto riguarda la velocità, è stato scelto, come nei test di laboratorio, di mantenere fissa la traiettoria elicoidale degli ugelli. Avendo fissato il passo dell'elica in 2 cm è stato possibile legare la velocità angolare ω a quella di traslazione verticale V_z .

I valori fissati per tali parametri sono stati 30 giri/min e 10 giri/min (il minimo possibile) per la velocità angolare, e 0.67 cm/sec e 0.33 cm/sec per la velocità di risalita (0.67 cm/sec corrisponde a una risalita di 4 cm ogni 2 sec, mentre 0.33 cm/sec corrisponde a una risalita di 4 cm ogni 6 sec).

I valori dei parametri operativi sono stati opportunamente combinati ed è stata costruita la serie delle 8 prove sull'argilla bruna. Per le successive due prove sul suolo di copertura sono stati selezionati solamente i due casi estremi ossia quello alla massima e alla minima potenza disponibile. I parametri operativi sono riportati in Tabella 5.2.

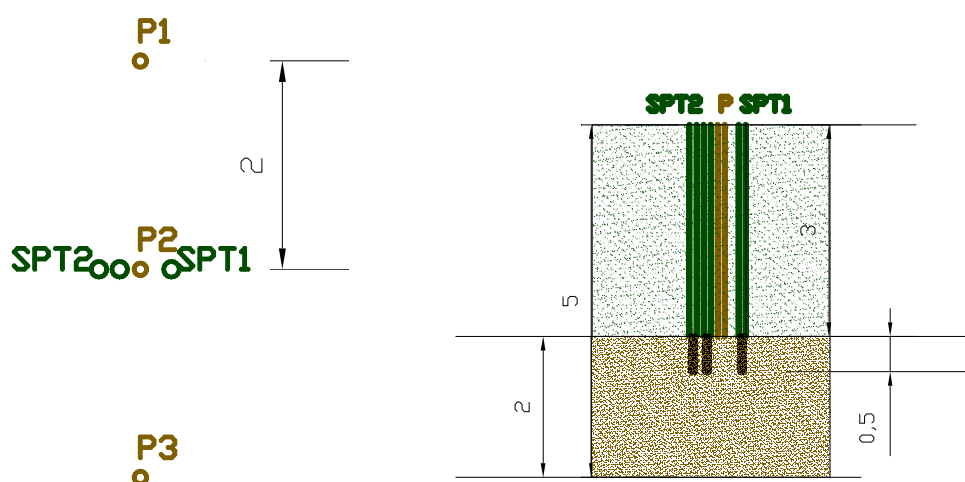


Figura 6.7 - Schema del posizionamento dei punti di misura

Tabella 6.1- Piano sperimentale

n° Prova	P [MPa]	ϕ_u [mm]	ω [giri/min]	Vz [cm/s]	Q [l/min]	W [kW]
1	37	2,2	10	0,67	114,5	70,61
2	37	2,2	30	3,33	114,5	70,61
3	37	1,8	30	3,33	71,5	44,09
4	37	1,8	10	0,67	71,5	44,09
5	27	1,8	10	0,67	64,4	28,98
6	27	1,8	30	3,33	64,4	28,98
7	27	2,2	10	0,67	86,0	38,70
8	27	2,2	30	3,33	86,0	38,70
9	27	1,8	30	0,67	64,4	28,98
10	37	2,2	10	3,33	114,5	70,61

Al fine di determinare il raggio di influenza dell'iniezione in profondità, sono state eseguite, per ciascun foro di prova, due test di tipo SPT. In questa prova viene determinato il numero di colpi di maglio di massa nota, in caduta da una altezza prefissata, che determinano l'infissione di un utensile di forma standard per 33 cm. Questo numero è legato alle caratteristiche geotecniche del terreno attraversato, ed in particolare alla densità relativa del terreno. Nel caso in cui il test SPT venga realizzato nel terreno interessato dall'azione del getto, è atteso un numero di colpi molto basso. Viceversa, nel terreno non interessato dal getto, il numero di colpi atteso è quello misurato nel terreno originale, e quindi più compatto.

La prima delle due prove è stata eseguita a una distanza di 30 cm dal foro di iniezione, in direzione ortogonale all'allineamento delle prove. La seconda è stata eseguita a distanza di 40 cm o 20 cm dal foro rispettivamente nel caso in cui nella prima prova sia stato ottenuto un valore basso o elevato del numero di colpi. Nel primo caso infatti, il valore basso del numero di colpi ha il significato di zona raggiunta dal getto d'acqua, e quindi aveva senso ricercare il confine di tale zona a maggiore distanza dal foro di iniezione. Nel secondo caso invece, il numero elevato di colpi, ha il significato di terreno non raggiunto dall'iniezione ed ha senso ricercare il confine della zona trattata ad una minore distanza dal foro di iniezione.

La prova avviene realizzando preventivamente un foro rivestito di diametro 15 cm mediante perforazione a distruzione. Successivamente il foro veniva approfondito con un diametro di perforazione pari a 10 cm e per la lunghezza di 50 cm. Dal fondo di questo viene eseguita la prova SPT che quindi interessa il materiale compreso tra la profondità di -3.5 m e quella di 4.00 m.



Figura 6.8 - Il foro di prova e dei 2 SPT di misura

Sui campioni di terreno recuperati nell'utensile a scarpa dell'SPT sono state eseguite analisi granulometriche, con l'obiettivo di verificare l'eventuale azione di selezione del getto, ovvero la capacità del getto di asportare e trasportare in superficie, nel flusso ascendente, solo le particelle di dimensioni inferiori ad un certo valore di diametro delle stesse. Inoltre, sempre con lo stesso obiettivo e per ottenere l'informazione complementare a quella fornita dall'analisi granulometrica sul terreno trattato, è stato campionato il fango fuoriuscito dal foro ed anche di questo è stata successivamente analizzata la granulometria.

Per le prove n°9 e n°10, è stata eseguita solo delle misure del diametro della colonna trattata.

6.7 Risultati - I diametri della colonna trattata e le variazioni granulometriche

I risultati, in termini di diametro della colonna trattata, provenienti dalle prove SPT sono mostrati nella Tabella 6.2, si osserva che tali valori sono compresi tra i 30 e i 50 cm, ma non è stato possibile rilevare nessuna relazione di questo con i parametri operativi (pressione, portata, velocità di movimento), questo è dovuto certamente al sistema di misura, tramite SPT, che visto il diametro di foro di cui necessita, non permette di apprezzare differenze sui valori del diametro trattato se non superiori ai 30 cm

Tabella 6.2 - I diametri della colonna trattata

n° prova	Diametro colonna trattata [cm]
1	30
2	30
3	40
4	30
5	30
6	30
7	35
8	30
9	40
10	50

Per le ultime due prove, al di sopra della falda ed eseguite a partire dalla profondità di 2 metri e fino alla superficie, è stata eseguita solo la misura del diametro del trattamento sulla superficie e quindi visibile (Figura 6.9).

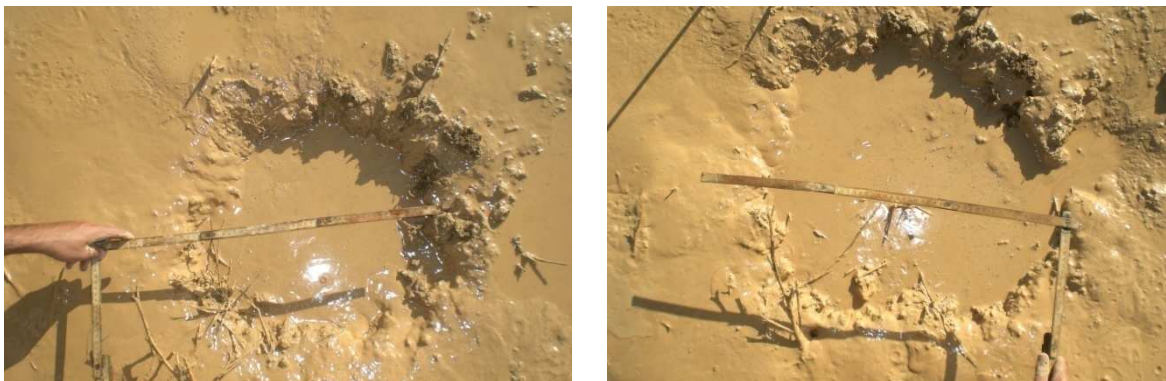


Figura 6.9- La colonna trattata nelle prove superficiali 9 e 10

Le analisi granulometriche sono state eseguite su tutti i campioni del fango fuoriuscito dal foro prelevati, e laddove siano stati prelevati sui campioni provenienti, dalle prove SPT. L'insieme delle prove e delle relative collocazioni è riportato in Tabella 6.3.

Tabella 6.3- Posizione misure e campionamenti - sono indicati in rosso i campioni su cui è stata eseguita la misura della granulometria

n° prova	SPT1	SPT2	fango
1	30 cm	50 cm	si
2	30 cm	20 cm	si
3	30 cm	40 cm	si
4	30 cm	NO	si
5	30 cm	NO	si
6	30 cm	20	si
7	30 cm	40	si
8	30 cm	20	Si
9	NO	NO	Si
10	NO	NO	Si

Le misure sono state per lo più interessate alla caratterizzazione dei fanghi fuoriusciti dal foro durante il trattamento, poiché i campioni provenienti dalle prove SPT, potevano essere inquinati da crolli avvenuti nelle colonne di terreno trattato, nell'immediato post-trattamento. Le misure granulometriche sono state eseguite tramite vagliatura a umido fino a diametri di 63 μm , mentre per diametri delle particelle inferiori è stato utilizzato uno strumento tipo Sedigraph.

I risultati delle misure, effettuate sui campioni di fango prelevato dal foro, per le prime 8 prove, eseguite tra i -5 e i -3m di profondità dal piano di campagna, nella zona satura, sono mostrati nella Figura 6.10, in tutti i grafici delle distribuzioni granulometriche è riportata anche la curva del terreno vergine (indicata con SA), in modo da permettere l'immediato confronto col materiale estratto durante il trattamento e la valutazione delle eventuali variazioni nella distribuzione granulometrica laddove presenti.

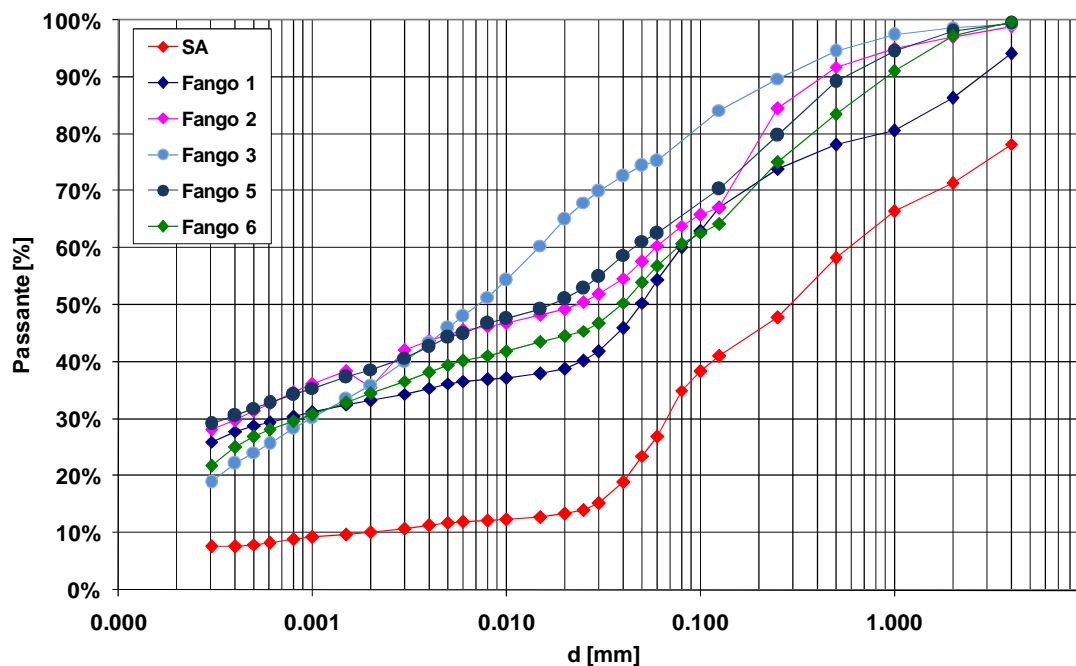


Figura 6.10 - Curve granulometriche dei campioni di fango - prove 1-8

L'analisi del grafico mostra che in tutti i casi esiste una certa selezione granulometrica, e che questa è tanto maggiore tanto maggiore è la massa d'acqua immessa nel terreno, e quindi quando il trattamento viene eseguito a minore velocità e a maggiore portata (e quindi a maggiore energia). Più in particolare può essere osservato che vengono asportate dal flusso di fango tutte le particelle con dimensione fino ai 4 mm. Invece, non è distinguibile una dipendenza nella variazione granulometrica dalla potenza idraulica impiegata.

Il grafico in Figura 6.11 riporta le curve granulometriche ottenute dall'analisi dei fanghi delle prove superficiali 9 e 10.

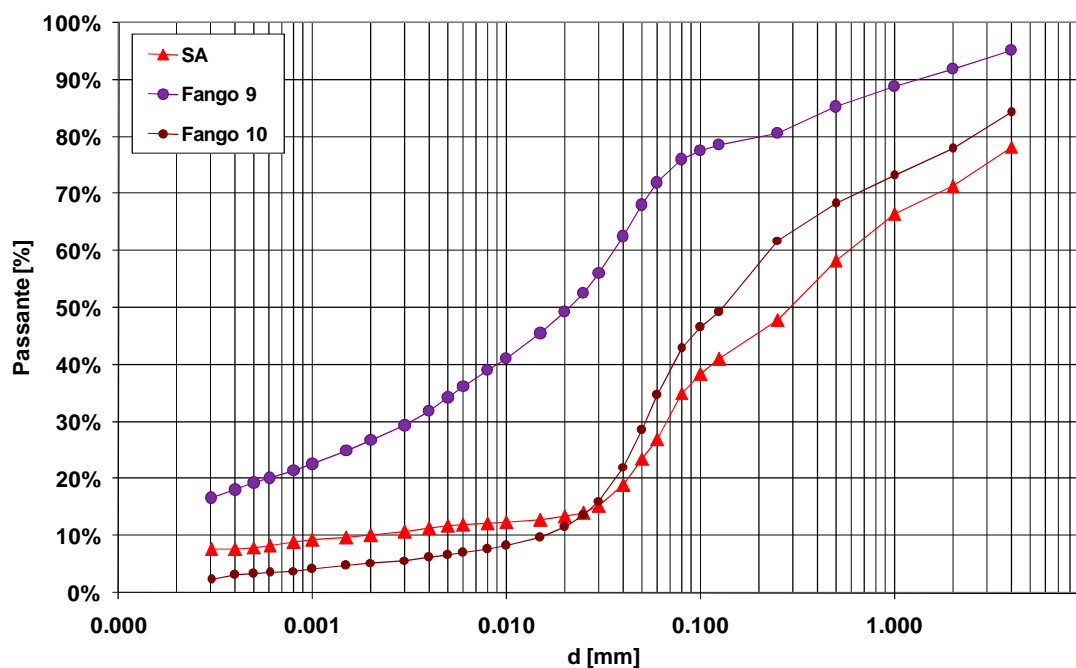


Figura 6.11 - Curve granulometriche relative alle prove superficiali 9 e 10

Il grafico relativo alla prova n°9, mostra ancora un asportazione delle frazioni fini e inferiori ai 2mm, mentre quello della prova n°10 mostra un asportazione di tutte le classi, questo è congruente col fatto che la prova n° 10 sia quella a maggior energia impiegata.

Pertanto si può concludere che la scarsa evidenza di selettività granulometrica riscontrata nelle prove di laboratorio può essere spiegata con la scarsa profondità del campione e quindi con l'insufficiente altezza del flusso lungo la quale può avvenire la sedimentazione delle frazioni grossolane del solido.

6.8 Conclusioni

La sperimentazione presentata ha dimostrato che, in una sabbia a argillosa, i getti generati combinando diametri degli ugelli di 1.8 e 2.2 mm, pressioni di 27 e 27 MPa, formano colonne di raggio variabile 25 cm e 50 cm, in funzione delle diverse combinazioni delle velocità di rototraslazione.

La sperimentazione ha mostrato una serie di limitazioni dovute essenzialmente alla difficoltà di esecuzione di campionamento e di misura in situ degli effetti prodotti dai getti.

Si può concludere comunque che per quanto riguarda il diametro della colonna trattata i risultati ottenuti in situ sono sovrapponibili a quelli ottenuti nella analoghe prove in laboratorio.

La campagna d'indagine, ha permesso lo studio della selettività granulometrica, che non è stato efficace in scala di laboratorio a causa delle dimensioni ridotte del campione.

7 Una possibile applicazione del getto d'acqua ad alta velocità alla bonifica dei siti contaminati

7.1 Introduzione

La tecnologia dei getti d'acqua ad alta velocità consente di concentrare una grande energia su una superficie estremamente ridotta. Essa è largamente utilizzata per il taglio delle pietre ornamentali, dei metalli e di molti altri materiali (Summers 1985). Attualmente la ricerca si rivolge allo studio di nuove possibilità di applicazione fra le quali la bonifica dei terreni contaminati (R. Ciccu, A. Bortolussi e B. Grosso, et al. 1999).

Le tradizionali tecniche di risanamento dei terreni contaminati (es. *vapor extraction*, *soil flushing*, *stream stripping*, *bioremediation*, *bioventing*, e *air sparging*) (Technology 2002) sono difficilmente applicabili quando i terreni sono poco permeabili. In queste condizioni i getti d'acqua ad alta velocità possono essere usati per aumentare la conducibilità idraulica, attraverso un'azione di mobilizzazione ed estrazione della frazione fine. La rimozione selettiva mediante pompaggio di acqua ad alta pressione delle frazioni fini di terreno in cui, nella maggioranza dei casi (circa il 90%), si trova adsorbito il contaminante, (tecnica nota come *upflow washing*) ha già conseguito ottimi risultati, sia nel trattamento di inquinamento da NAPL, sia in quello da metalli pesanti (Niven e Khalili 1998). Se nei terreni fini dunque l'obiettivo è quello di aumentare la permeabilità, nei terreni di media permeabilità, i getti d'acqua ad alta velocità possono costituire il veicolo per l'introduzione e la distribuzione nel terreno contaminato di sostanze (in forma di soluzione o di sospensione) in grado di ridurre o limitare gli effetti della contaminazione.

La combinazione di questi due effetti, l'incremento della conducibilità idraulica e la possibilità di introduzione di un reagente, rende la tecnica dei getti d'acqua ad alta velocità particolarmente adatta agli interventi di bonifica in situ, e specificatamente alla realizzazione di barriere o zone permeabili reattive (PRB) considerate attualmente la tecnica di intervento più competitiva (EPA 2001).

Le PRB, posizionate in modo da intercettare il flusso di contaminante, funzionano come una sorta di grande filtro capace di abbattere la contaminazione. Esse vengono correntemente realizzate mediante lo scavo di una trincea e il suo successivo riempimento con un materiale altamente permeabile a cui viene miscelato l'opportuno reagente, oppure attraverso una serie di pozzi allineati in cui viene iniettata la sostanza idonea alla degradazione del contaminante.

La tecnica di costruzione delle PRB qui proposta e descritta in dettaglio, consiste nel trattamento colonnare del terreno con i getti d'acqua ad alta velocità con il duplice obiettivo di aumentare localmente la permeabilità e di immettere il reagente.

L'idea guida è quella di inserire in un foro verticale preventivamente realizzato, una lancia alla cui estremità è posto un ugello dal quale fuoriesce il getto. L'ugello viene animato di moto elicoidale: la componente rotatoria del moto fa sì che il getto raggiunga i punti disposti su un arco di 360° mentre la componente di traslazione consente, ad ogni rotazione dell'ugello, di trattare fette di terreno sovrapposte. Viene interessato così un volume di terreno avente forma di cilindro con asse verticale.

L'incremento della permeabilità di un assegnato volume di terreno, è ottenuta attraverso la realizzazione di una griglia di colonne verticali. La dimensione del lato della griglia (distanza fra due colonne successive) appare uno dei parametri fondamentali della metodologia di intervento ed è legata alla distanza alla quale l'incremento di permeabilità è ancora soddisfacente.

La valutazione dell'efficacia di tale tecnica è stata condotta attraverso due attività complementari: la modellazione numerica e la sperimentazione alla scala di laboratorio.

La modellazione numerica ha consentito di valutare preliminarmente l'efficacia della barriera realizzata con questa tecnica e confrontarla con quella delle barriere tradizionali. La sperimentazione è stata condotta per ricercare i valori dei parametri operativi dell'apparecchiatura che massimizzano i risultati del trattamento e per individuare i terreni su cui la tecnica risulta più efficace.

Nel seguito, dopo una sintetica trattazione della tecnologia dei getti d'acqua ad alta velocità, vengono confrontati, mediante modellazione numerica, la capacità di decontaminazione e il costo della barriera realizzata con tecnologia *waterjet* con gli analoghi parametri relativi a barriere realizzate in modo tradizionale. Viene poi presentato l'apparato sperimentale realizzato per studiare l'effetto del getto d'acqua sul terreno e vengono esposti i risultati ottenuti principalmente in termini di raggio di influenza del getto.

7.2 Barriere Permeabili Reattive (PRB)

Le barriere o zone permeabili reattive rappresentano una modalità di intervento per la bonifica dei siti contaminate *in situ*, tra le più competitive nel panorama mondiale; questo anche per via dei molteplici pregi che si traggono dal suo impiego ((EPA 2002):

- semplicità di messa in opera, manutenzione minima e bassi costi di gestione;
- ottimo rapporto costi-benefici;
- capacità di utilizzo nei casi di presenza di molteplici sorgenti distribuite e spesso difficilmente individuabili;

Le PRB possono essere realizzate secondo i seguenti schemi:

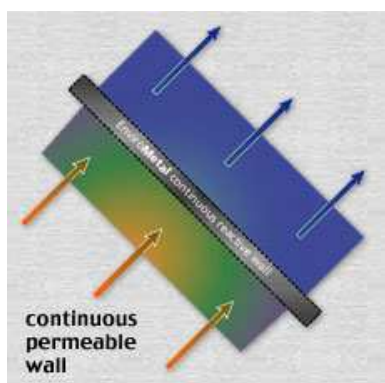


Figura 7.1 - Barriera permeabile reattiva continua

Barriera continua (Figura 7.1): il materiale reattivo viene posizionato perpendicolarmente alla direzione del plume di contaminante (alle linee di flusso).

La sostanza reagente viene inserita in una trincea continua riempita con materiali caratterizzati da un'alta conducibilità idraulica rispetto al terreno nel quale è inserito, così da non provocare significative alterazioni al flusso dell'acquifero.

Barriera ad imbuto (*funnel and gate*): Questa configurazione di PRB (Figura 7.2) è costituita da una zona centrale (*gate*) che viene attraversata dal flusso contaminato, questa come nella barriera continua è riempita da un materiale altamente permeabile a cui viene miscelato il reagente; ai suoi lati vengono realizzati due setti impermeabili (*funnel*) che indirizzano il flusso verso la zona centrale. Questa configurazione un miglior controllo di processo, ma ha come svantaggio progettuale che la riduzione di sezione può far aumentare in modo incontrollato la velocità del flusso attraverso la zona di trattamento riducendo i tempi di residenza dell'acqua contaminata nella zona di trattamento.

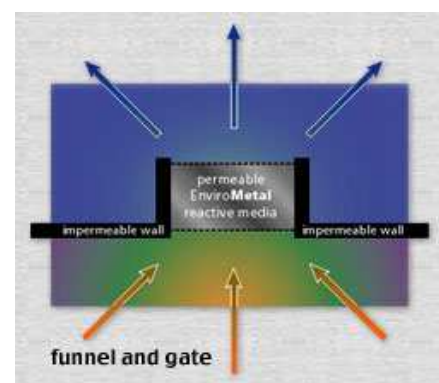


Figura 7.2 - Barriera permeabile reattiva funnel and gate

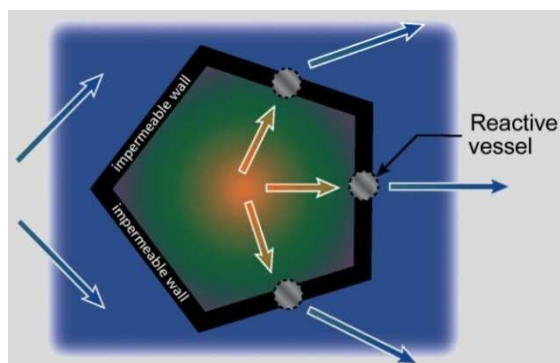


Figura 7.3 - Barriera permeabile reattiva
reactive vessels

Colonne reattive – (reactive vessels) (Figura 7.3) è una configurazione molto simile al funnel and gate; mediante setti impermeabili, trincee o canali di arginamento il plume contaminato viene indirizzato verso delle aree di trattamento che hanno generalmente forma cilindrica

7.3 La tecnica di realizzazione delle PRB

Le tecniche di scavo sono basate sulla creazione di una trincea la quale viene riempita con una miscela di un materiale permeabile e di sostanza reagente.

Le tecniche attualmente utilizzate sono:



Figura 7.4 - Macchina speciale per la costruzione delle
PRB

Trincea a scavo continuo di trincea: se si tratta di piccole profondità viene realizzata mediante tecniche di scavo tradizionali, altrimenti vengono utilizzate tecniche di scavo speciali come quelle per la costruzione dei diaframmi. Esiste sul mercato una macchina specializzata (Figura 7.4) viene dotata di un braccio di scavo a ruota di tazze. Lo scavo viene eseguito per setti successivi di circa 1-2m di lunghezza. Il braccio è sormontato da una tramoggia che a fine scavo permette la messa in posto del materiale di riempimento della barriera. Il

limite di questa tecnica è rappresentato dalla profondità, non possono essere superate infatti profondità di 15-20 m.

Fila di pozzi: le PRB possono essere costruite specialmente laddove lo strato di terreno contaminato sia particolarmente potente mediante la realizzazione di una fila di pozzi, al cui interno viene inserito il material reagente. In questo caso la maggior difficoltà progettuale consiste nel calcolo della distanza tra i pozzi stessi, che deve essere sufficientemente piccolo da garantire la continuità della zona reagente, ma non deve essere troppo sottostimata poiché l'aumento del numero dei pozzi, specialmente se profondi incide fortemente sul costo dell'opera.

Tecniche ad iniezione: la costruzione di PRB tramite le tecniche ad iniezione può avvenire utilizzando tecnologie differenti come :

- idrofratturazione verticale: La sostanza reattiva che costituirà la barriera spesso viene sospesa in un fango. La miscela fangosa viene inserita nelle fratture formando la barriera

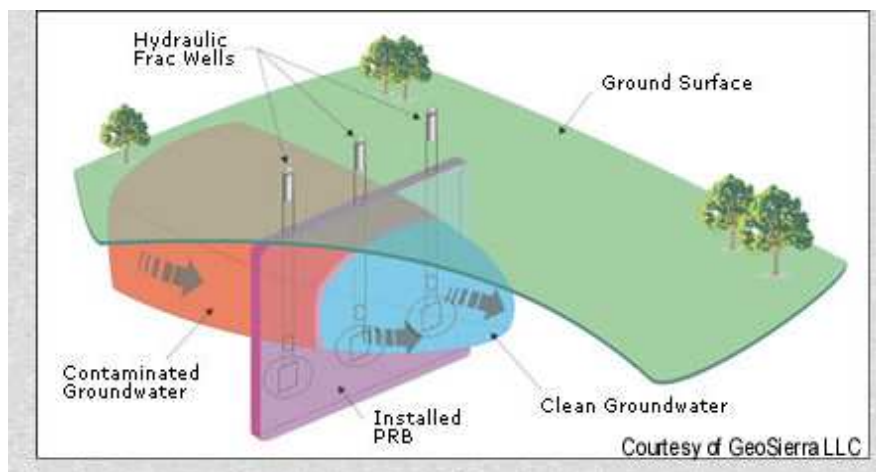


Figura 7.5 - Realizzazione di PRB per idrofratturazione verticale

- iniezione pneumatica (Figura 7.6). Questa tecnica è composta da due fasi sequenziali: la fatturazione pneumatica ed l'iniezione pneumatica. La fatturazione è realizzata tramite il pompaggio di un gas (azoto) ad alta pressione che permette poi l'inserimento della sostanza reattiva, utilizzando sempre il gas come veicolo di introduzione. La fatturazione ed iniezione pneumatica è utilizzandole per molte tipologie di terreni comprese le sabbie, le argille e i limi.

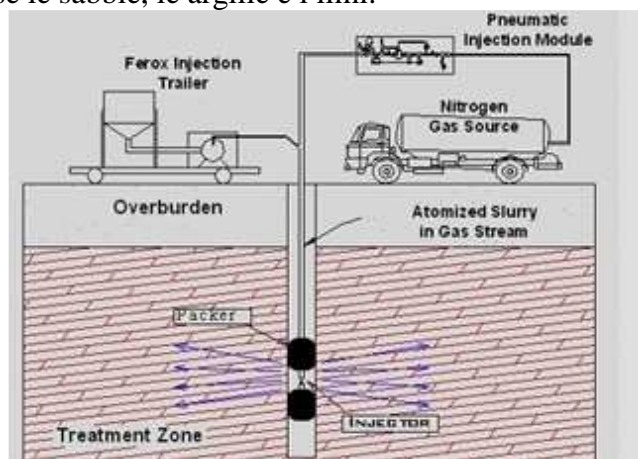


Figura 7.6 - Realizzazione di PRB per idrofratturazione vertical

La tecnologia *waterjet* per la realizzazione delle barriere reattive: L'applicazione della tecnologia *waterjet* alla realizzazione delle barriere reattive consiste nel formare una serie allineata di colonne verticali di terreno ad alta permeabilità in cui vengono inseriti i reagenti scelti per la decontaminazione.

Le colonne vengono realizzate, con uno schema analogo a quello utilizzato per il consolidamento colonnare con la tecnica del *jetgrouting*, e cioè mediante introduzione della lancia in un foro preventivamente realizzato con tecniche di perforazione tradizionale o con il *waterjet* stesso, fino alla profondità desiderata. Segue l'azionamento di due o più getti d'acqua orizzontali e l'estrazione della lancia che viene contemporaneamente animata da un moto di rotazione attorno al proprio asse (Figura 7.7). Quello che si ottiene è una colonna verticale di terreno, ad elevata permeabilità, da cui viene estratta sia la frazione granulometrica più fine sia gran parte del contaminante.

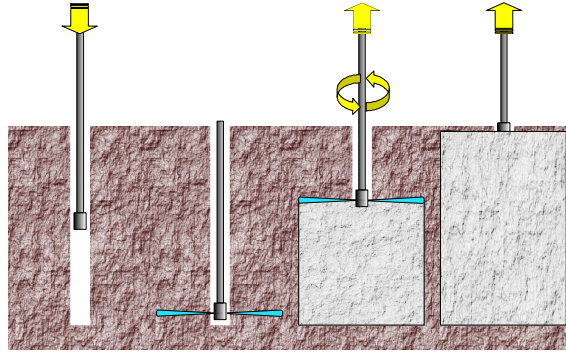


Figura 7.7 - Schema di funzionamento della lancia *waterjet* in una sezione verticale di terreno.

7.4 L'approccio modellistico nell'applicazione delle PRB

L'efficacia della tecnica *waterjet* per la costruzione delle barriere permeabili reattive, è stata valutata mediante approccio modellistico (Gallo, Cigagna, et al. 2004). Lo studio degli effetti di una barriera reattiva sulla diffusione di un contaminante coinvolge tre diversi processi fisici: il flusso nel mezzo saturo, il trasporto multispecie e la biodegradazione. L'equazione che governa il flusso nel mezzo saturo è la seguente (Freeze e Cherry 1979):

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla h) \quad (7.1)$$

dove h è il carico idraulico, \mathbf{K} è la conducibilità idraulica del mezzo poroso e S_s è il coefficiente di immagazzinamento specifico.

L'equazione che governa il trasporto multispecie (modello *Advection/Dispersion*) è la seguente (Domenico e Schwartz 1990):

$$\phi \frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} C_i) = \nabla \cdot (\phi \mathbf{D}_h \cdot \nabla C_i) - \phi B_i, \quad i = S, O \quad (7.2)$$

dove ϕ è la porosità del mezzo poroso, C_i è la concentrazione della i -esima specie, \mathbf{D}_h è la dispersione idrodinamica, \mathbf{v} è la velocità di Darcy e B è il termine di pozzo/sorgente. L'indice S e O rappresentano rispettivamente il substrato organico (contaminante) e l'ossigeno disciolto.

Il modello scelto per la biodegradazione aerobica tiene conto di tre specie: il substrato organico, l'accettore di elettroni (ossigeno) e la popolazione batterica ed è governato dalle seguenti equazioni (Gallo 2003):

$$\begin{aligned} B_s &= C_x \mu_0 Y_s \frac{C_s}{K_s + C_s} \frac{C_o}{K_o + C_o} \\ B_o &= C_x \mu_0 Y_o \frac{C_s}{K_s + C_s} \frac{C_o}{K_o + C_o} \\ \frac{\partial C_i}{\partial t} &= -C_x \left(\mu_0 \frac{C_s}{K_s + C_s} \frac{C_o}{K_o + C_o} - k_d \right) \end{aligned} \quad (7.3)$$

dove μ_0 rappresenta il tasso massimo di degradazione, K_s e K_o sono rispettivamente la costante di semi-saturazione del contaminante e dell'ossigeno, Y_s e Y_o sono rispettivamente i coefficienti di degradazione del contaminante e dell'ossigeno, k_d è il coefficiente di decadimento batterico e C_x è la massa della popolazione batterica per unità di volume.

La soluzione numerica del sistema di equazioni presentato è stata impostata utilizzando uno schema ad elementi finiti standard per la discretizzazione spaziale ed uno schema alle differenze finite per la discretizzazione temporale.

Le equazioni di biodegradazione sono state accoppiate alle equazioni del modello A/D utilizzando l'approccio noto come operation-splitting standard. Per ogni passo temporale,

viene risolta l'equazione del trasporto, la concentrazione su ogni nodo viene corretta dal termine di biodegradazione.

Il modello presentato è stato applicato per valutare l'effetto di tre diverse tecniche di realizzazione per una PRB a rilascio passivo di ossigeno per la decontaminazione, da un composto organico, di una falda acquifera.

Le tre tipologie messe a confronto sono:

- a) una linea di 21 pozzi di diametro 100 mm e con interasse pari a circa 1 m;
- b) una trincea continua riempita di materiale con permeabilità pari a $2 \cdot 10^{-2}$ m/s;
- c) una linea di 10 colonne di terreno trattato col *waterjet* (raggio di influenza pari a 0.5 m).

La modellazione ha riguardato un dominio rettangolare, rappresentante un piano orizzontale di conducibilità idraulica pari a $2 \cdot 10^{-3}$ m/s, lungo 100 m e largo 30 m, con la fonte di contaminante posta su un lato. La barriera di lunghezza pari a 18 m in modo da garantire la completa intercettazione del contaminante, è stata posizionata in direzione perpendicolare al gradiente idraulico, che è stato posto pari a $5 \cdot 10^{-3}$ m/m.

Il modello prevede che, nei nodi facenti parte della barriera, la concentrazione di ossigeno sia costante nel tempo e pari a 8 mg/l (Figura 7.8). Questo significa che con i tre interventi, interessando una superficie diversa (e quindi un numero di nodi diverso), viene introdotta nel dominio quantità di ossigeno differente.

Questo tipo di condizione al contorno è ottenibile immettendo nella barriera un composto in grado di rilasciare passivamente l'ossigeno (ORC)¹¹ nell'acqua di falda e capace dunque di promuovere la biodegradazione.

Il dominio è stato discretizzato utilizzando una mesh non strutturata di circa 10800 elementi triangolari e circa 5500 nodi e il tempo totale di simulazione è di 80 giorni. In questo intervallo di tempo viene raggiunto il regime stazionario sia per il flusso che per il trasporto.

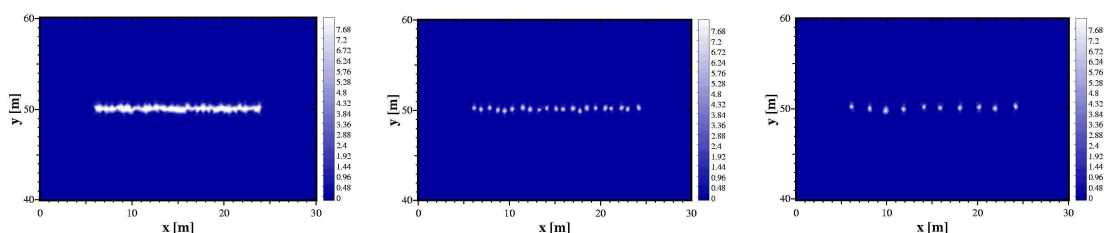


Figura 7.8 – Condizioni iniziali dell'ossigeno per la barriera continua (sinistra), per il caso dei pozzi (centro) e per il caso *waterjet* (destra).

7.5 Modello della modifica della permeabilità

L'azione del getto d'acqua nel terreno provoca la modifica della sua struttura e la mobilitazione delle particelle più fini, che unite all'acqua iniettata formano un fango che risale lungo il foro di iniezione e può essere dunque allontanato. Come si può facilmente immaginare, a causa delle eterogeneità locali del terreno l'effetto del getto è generalmente non omogeneo.

La possibile via da seguire per la modellazione della variazione della permeabilità nella zona di trattamento non è unica. Il modello qui proposto tiene conto di due aspetti: la variazione di permeabilità, per asportazione della frazione fine, espressa come funzione della distanza dal punto di applicazione del getto e l'eterogeneità dell'effetto.

La funzione di modifica della permeabilità (K) utilizzata per il calcolo è la seguente:

¹¹ ORC – Oxygen Release Compound

$$K(x, y) = K_0(x, y) \exp(-r(x, y)/R^*) (0.5 + A \cdot \text{rand}()) \quad r \leq r_{\text{infl}} \quad (7.4)$$

$$K(x, y) = K_0(x, y) \quad r > r_{\text{infl}}$$

dove K_0 è la conducibilità idraulica iniziale del terreno, R^* è una costante di attenuazione, r è la distanza dal punto di applicazione, r_{infl} è il raggio di influenza, A è il fattore di scala e $\text{rand}()$ è un generatore di numeri casuali.

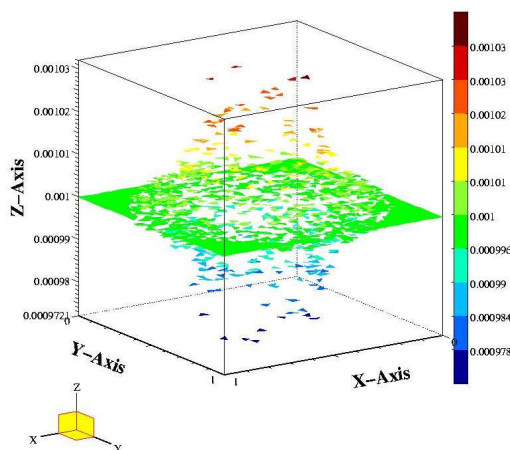


Figura 7.9 – Ipotesi di modifica della permeabilità

Appare chiaro che tale modifica debba venire applicata esclusivamente fino una distanza, dal punto di applicazione, pari al raggio d'influenza, definito come distanza massima per cui siano individuabili gli effetti prodotti dal getto.

Il raggio d'influenza è quindi un parametro fondamentale per la modellazione, per le simulazioni si è scelto un raggio della colonna di terreno trattato dal *waterjet* pari a 0.5 m.

7.6 Risultati della simulazione

Le simulazioni, riportate in Figura 7.10 mostrano che il contaminante, al raggiungimento delle condizioni di stazionarietà, (80 giorni) viene contenuto dalla barriera in tutti e tre i casi.

Il confronto tra le diverse tecniche è stato dunque effettuato, in termini di costo di realizzazione della barriera ed in termini di quantità di contaminante e di ossigeno consumate dalla barriera.

La Tabella 7.1 riporta il risultato dell'analisi dei costi relativi alle tre tecniche di intervento da cui appare chiaro che la tecnologia *waterjet* sia competitiva rispetto alle tecniche tradizionali, avendo circa lo stesso costo rispetto alla trincea continua e un costo inferiore alla linea di pozzi. La valutazione è stata effettuata considerando unicamente i costi di costruzione e trascurando il costo di somministrazione dell'ossigeno, considerando il quale le conclusioni a cui si è giunti dovrebbero essere rafforzate.

Tabella 7.1 -- Sommario dei costi per una barriera di tipo PRB profonda 20 m e lunga 18. (US-EPA, 2002)

	Larghezza PRB	Lunghezza PRB	Costo unitario	Costo [€]
Trincea continua	80 cm	18 m	1500 €/m	27000
Pozzi	10 cm	n° 21	1500 €/cad	31500
Waterjet	100 cm	n° 10	2500 €/cad	25000

In Figura 7.11 vengono mostrate le masse di contaminante ed ossigeno consumate in funzione del tempo, si può notare come, al raggiungimento dello stato stazionario, coi tre interventi viene rimossa la stessa quantità di contaminante, con lo stesso consumo di ossigeno.

La Tabella 7.2 riassume i bilanci di massa di contaminante ed ossigeno nelle condizioni finali ($t=80$ giorni) al raggiungimento dello stato stazionario.

Tabella 7.2 – Bilancio di massa per le 3 tipologie costruttive dopo 80 giorni.

	Massa di ossigeno [g]	Massa di contaminante [g]
Trincea Continua	30233	108839
Pozzi	29990	107964
Waterjet	29791	107248

In sintesi dunque, la barriera formata dalla linea di colonne di terreno trattato con *waterjet* richiede minori costi di esecuzione, migliora la mobilità dell'ossigeno pur mantenendo a livelli ottimali la degradazione del substrato organico.

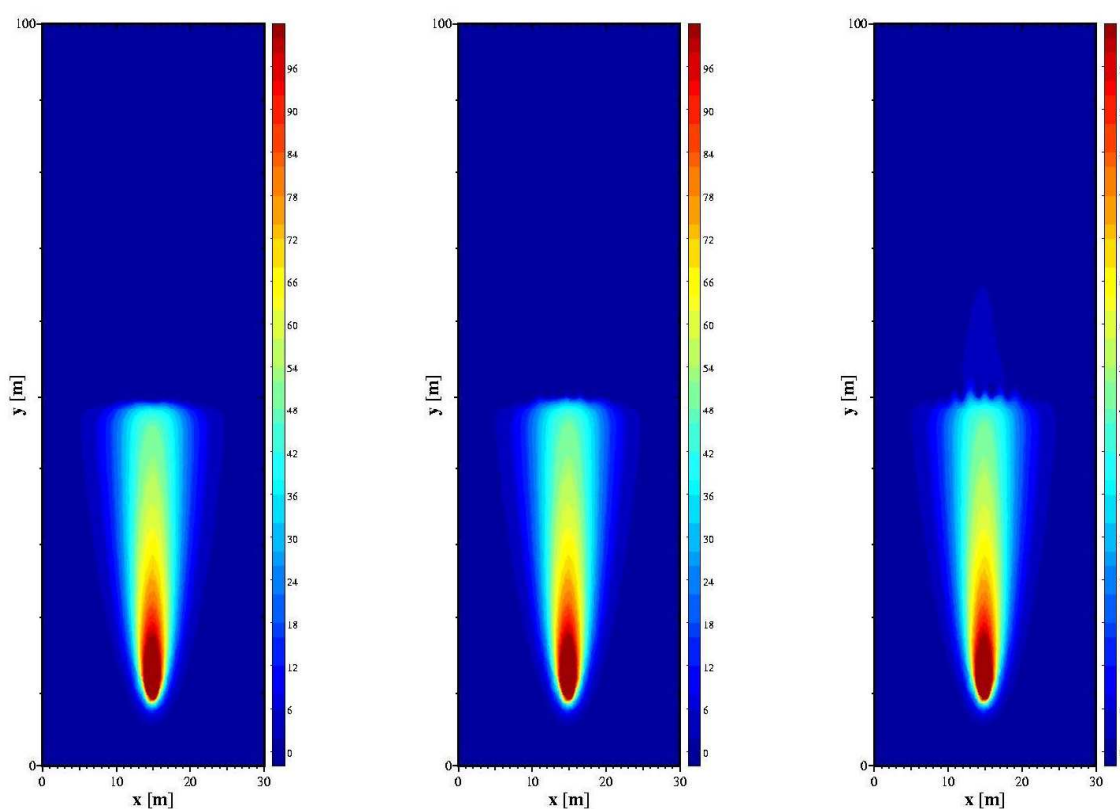


Figura 7.10 – Plume del contaminante dopo 80 giorni di simulazione. A sinistra per il caso della barriera continua, al centro per

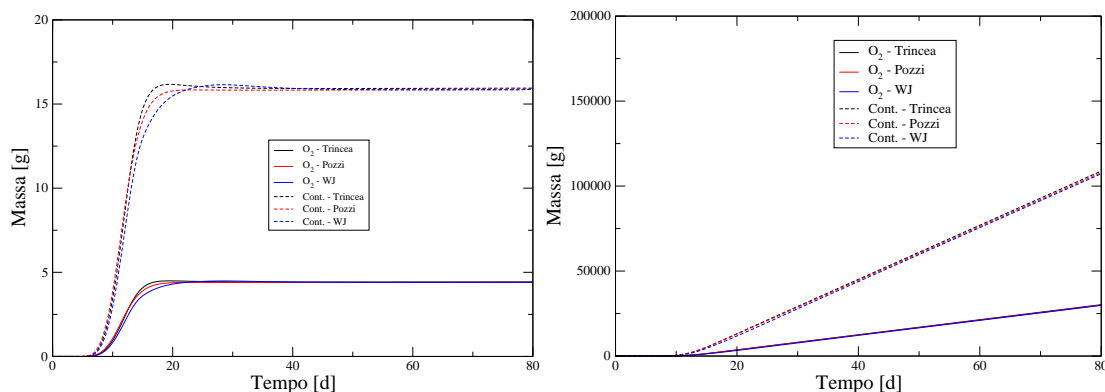


Figura 7.11 – Masse di contaminante ed ossigeno consumati nel dominio in funzione del tempo (sinistra) e masse cumulate di contaminante ed ossigeno in funzione del tempo (destra).

7.7 Conclusioni

La tecnologia *waterjet* consente di realizzare colonne di terreno ad alta permeabilità. Il diametro di queste colonne dipende dalle caratteristiche del terreno e dai parametri operativi del sistema di generazione del getto d'acqua.

Le colonne di terreno così trattato possono essere utilizzate per introdurre reagenti nel terreno e formare barriere reattive adatte ad intercettare e risanare un plume di contaminante.

L'efficienza di un sistema barriera così realizzato è stata valutata mediante la costruzione di un modello capace di simulare i fenomeni di trasporto e biodegradazione dell'inquinante.

L'analisi ha messo in evidenza che la barriera costituita da colonne di terreno trattato con il *waterjet* ha la stessa efficacia di confinamento dell'inquinante di barriere realizzate con la tecnica della trincea continua e della linea di pozzi. Inoltre il costo di realizzazione di una tale barriera è inferiore a quello relativo alla linea di pozzi e circa uguale a quello della trincea continua, presentando l'ulteriore vantaggio di non dover rimuovere il materiale contaminato.

8 Conclusioni

La tecnologia dei getti d'acqua ad alta velocità consente di concentrare una grande energia su una superficie estremamente ridotta. Essa è largamente utilizzata per il taglio delle pietre ornamentali, dei metalli e di molti altri materiali, ed è utilizzato come supporto dello scavo e per il consolidamento colonnare nelle terre. Attualmente la ricerca si rivolge allo studio di nuove possibilità di applicazione fra le quali la bonifica dei terreni contaminati.

In questo lavoro viene riportato uno studio degli effetti del getto d'acqua ad alta velocità sulle terre, ed in particolare, sulle sue capacità di penetrazione in diverse condizioni operative.

Lo studio è stato articolato in tre parti: nella prima viene studiata l'azione su un terreno operata da un getto fisso: dall'esame degli spostamenti misurati delle particelle di terreno coinvolte dal getto, viene ricavata la velocità di penetrazione e la sua variazione in funzione del tempo durante l'avanzamento del fronte del getto all'interno del materiale.

Allo scopo è stata utilizzata una tecnica di misura derivante dalle esperienze nel campo della fluidodinamica, detta PIV (Particle Image Velocimetry), accoppiata alla videoripresa ad alta velocità, che oggi trova le sue prime applicazioni nel campo della meccanica delle terre e della geotecnica.

Lo studio ha mostrato la validità della tecnica per la misura delle deformazioni indotte dal getto d'acqua su una terra, e di come questa può essere utilizzata per la misura della velocità di penetrazione del getto.

La sperimentazione è stata condotta su un unico tipo di terreno, ma in un ampio capo di condizioni operative, per le quali è stato studiato il profilo della velocità di penetrazione, lungo l'asse del campione stesso, e la sua variazione in funzione delle caratteristiche di generazione del getto.

L'analisi della forma del profilo della velocità di penetrazione mostra che questa viene dissipata in modo esponenziale, all'avanzare del getto lungo il campione, e che tale dissipazione sia più accentuata se a parità di potenza idraulica, viene privilegiato il contributo della portata rispetto a quello della pressione, ma è da tenersi sempre in conto il fatto che i sistemi ad alta pressione sono molto più complessi tecnologicamente e quindi costosi, rispetto a quelli ad alta portata.

Nella seconda fase è stato studiato l'effetto del movimento traslatorio e rototraslatorio del getto sullo spostamento delle particelle di terreno e quindi sulla distanza di penetrazione nel tempo fino al valore massimo raggiungibile per un dato terreno, in funzione dei parametri di movimentazione della lancia. Le sperimentazioni sono state condotte in primo luogo in laboratorio in condizioni simili a quelle dell'applicazione industriale, utilizzando un'attrezzatura sperimentale, appositamente costruita, e lavorando su campioni di terreno opportunamente ricostruiti. Successivamente è stata eseguita una campagna di prove *in situ* al fine di verificare la rispondenza dei risultati di laboratorio alla scala reale. Per tale scopo è stata utilizzata un'attrezzatura dotata di lancia a movimento rototraslatorio, normalmente impiegata per operazioni di "jet grouting", modificata per generare getti a sola acqua.

La sperimentazione in laboratorio, ha dimostrato che, in una sabbia avente massa volumica pari a $1,7 \text{ kN/m}^3$, i getti generati con ugelli di diametro 1 mm e pressione 40 MPa, formano colonne di raggio variabile 23 cm e 36 cm nel suolo secco, e un valore tra 19 cm e 27 cm nel suolo saturo, in funzione della velocità di roto-traslazione della lancia.

La sperimentazione è stata condotta su un unico tipo di terreno, con parametri operativi fissi e con la sola variazione della velocità di roto-traslazione della lancia, e dovrà proseguire con l'obiettivo di studiare gli effetti dell'aumento della pressione di generazione e della portata dei getti. Infatti, è evidente, che l'aumento dell'energia dei getti determina l'incremento del

raggio di influenza e un più energico trattamento del terreno, ma d'altra parte significa maggiori costi. Deve pertanto essere ricercata quella condizione ottimale in cui le risorse impegnate determinano il massimo effetto positivo. Inoltre sembra essere promettente la realizzazione di prove con elevata velocità di rotazione e ridotta velocità di traslazione.

La sperimentazione ha mostrato, però, una serie di limitazioni dovute essenzialmente alle grandi dimensioni del campione, alle difficoltà nel campionamento del materiale fangoso a causa del forte mescolamento e della difficoltà nella compressione e misura del moto delle particelle.

La sperimentazione in situ presentata ha dimostrato che, in una sabbia a argillosa, i getti generati combinando diametri degli ugelli di 1.8 e 2.2 mm, e pressioni di 27 e 27 MPa, formano colonne di raggio variabile 25 cm e 50 cm, in funzione delle diverse combinazioni delle velocità di rototraslazione, anche queste hanno mostrato una serie di limitazioni dovute essenzialmente alla difficoltà di esecuzione di campionamento e di misura in situ degli effetti prodotti.

Si può, comunque, concludere che per quanto riguarda il diametro della colonna trattata i risultati ottenuti *in situ* sono sovrapponibili a quelli ottenuti nella analoghe prove in laboratorio.

La campagna d'indagine, ha permesso lo studio della selettività granulometrica, che non è stato efficace nello studio in scala di laboratorio a causa delle dimensioni ridotte del campione.

Nella terza fase è stata esplorata attraverso la modellazione numerica la possibilità di applicazione della tecnica alla bonifica dei terreni contaminati.

La tecnologia *waterjet* consente di realizzare colonne di terreno ad alta permeabilità. Il diametro di queste colonne dipende dalle caratteristiche del terreno e dai parametri operativi del sistema di generazione del getto d'acqua.

Le colonne di terreno così trattate possono essere utilizzate per introdurre reagenti nel terreno e formare barriere reattive adatte ad intercettare e risanare un plume di contaminante.

L'efficienza di un sistema barriera così realizzato è stata valutata mediante la costruzione di un modello capace di simulare i fenomeni di trasporto e biodegradazione di un inquinante organico.

L'analisi ha messo in evidenza che la barriera costituita da colonne di terreno trattato con il *waterjet* ha la stessa efficacia di confinamento dell'inquinante di barriere realizzate con la tecnica della trincea continua e della linea di pozzi. Inoltre il costo di realizzazione di una tale barriera è inferiore a quello relativo alla linea di pozzi e circa uguale a quello della trincea continua, presentando l'ulteriore vantaggio di non dover rimuovere il materiale contaminato.

L'obiettivo proposto in questo lavoro necessita lo studio di un grande numero di casi di condizioni operative e di tipologie di terreno, e non può certo essere qui esaurito.

Bibliografia

- Adrian, R.J. "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics." *Ann. Rev. Fluid Mec.*, 1991.
- Anderson, K.H., and J.P.E. Domsch. "A physiologic method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils." In *Soil Biology and Biochemistry*, 215-221. 1978.
- Atmatzidis, D.K., and F.R. Ferrin. "Laboratory investigation of soil cutting with a water jet." *Proceedings of the Fourth American Water Jet Conference (WJTA)*. August 26-28, Berkeley, California, 1987.
- Cable, J.W., R. Dilly, M.L. Duchene, A.C. Elmore, and D.A. Summers. "Environmental remediation using high-pressure waterjets for emplacement of treatment media." *18th International Conference on Water Jetting*. 13-15 September, Gdansk, Poland, 2006. 239-248.
- Ciccu, R., A. Bortolussi, B. Grosso, and A. Muntoni. "Use of the Waterjet technology for the remediation of contaminated soils." *Proc. of IREWAS 99 Global*. Gaballah I. et al. eds, 1999.
- Ciccu, R., A. Bortolussi, M. Cigagna, C. Gallo, B. Grosso, and P. Tronci. "Indagine sull'applicabilità della tecnologia water-jet alla bonifica dei siti contaminati." *GEAM Rivista Geoingegneria Ambientale e Mineraria (GEAM)*, 2006.
- Ciccu, R., and G. Massacci. "Problemi di sicurezza nell'uso della tecnologia waterjet." *Convegno nazionale "Materiali Lapidari: la prevenzione dei Rischi per l'ambiente e per i lavoratori"*. Morbegno (Sondrio)- 30 settembre - 1 ottobre, 1993.
- Ciccu, R., and A. Bortolussi. "Waterjet in dimensional stone quarrying." *Water Jet Applications in Construction Engineering*. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1998.
- Domenico, P. A., and F. W. Schwartz. *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- EPA. "Annual status report-Treatment technologies for site cleanup." 2001.
- EPA. "Economic analysis of the implementation of permeable reactive barriers for remediation of contaminated ground water." 2002.
- EPA. "Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods." 2004.
- Freeze, R. A., and R. A. Cherry. *Groundwater*. New Jersey: Prentice-Hall, 1979.
- Gallo, C. "Coupled biodegradation and two-phase flow: a numerical study of interactions and field applications, Ph.D. dissertation." Delft, The Netherlands, 2003.
- Gallo, C., M. Cigagna, P. Tronci, B. Grosso, and R. Ciccu. "Using water jet for increasing reactive barriers efficiency in contaminated soil: a preliminary evaluation." *International Conference on Computational Methods in Water Resources*. 2004.
- Hirsch, K.D. "Three dimensional particle image velocimetry." *Meas. Sci. Tech*, 1995.
- Larjola, J. "High speed pumps in water jet cutting." *11th International Conference on Jet Cutting Technology*. St. Andrews, Scotland, 8-10, September, 1992.
- Meyers, J.F., and H. Komine. "Doppler global velocimetry – a new way to look at velocity." *ASME Fourth International Conference on Laser Anemometry*. Cleveland, 1991.
- Niven, R.K., and N. Khalili. "Gas-liquid upflow washing for in situ remediation of diesel-contaminated soils." *Canadian Geotechnical Journal*, 1998.
- Raffel, M., and Kompenhans J Willert C. *Particle Image Velocimetry – A practical guide*. Springer, 1998.
- Rohle, I. "Three Dimensional Doppler global velocimetry in the flow of a fuel spray nozzle and in the wake region of a car." *Flow Measurement and Instrumentation*, 1997.
- Rotta, J. *Die Aerodynamische Versuchsanstalt in Gottingen, ein Werk Ludwig Prandtls*. Gottingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1990.
- Summers, D.A. "From brute force to intelligent use - the birth of a new technology." *Proc. 14th Conference on Jet Cutting Technology*. Cagliari, 1994.
- . "A Review of Water Jet Excavation Research." *Proc. 26th US Symp. on Rock Mechanics*. Rapid City, 1985. 895-903.
- Summers, D.A., and M. Mazurkiewicz. "Waterjet short course notes." *Seminario tenuto nel Dipartimento di Ingegneria Mineraria*. Cagliari-Giugno, 1991.
- Technology, U.S. Department of Energy - Office of Environmental Management - Office of Science and. "Remediation of DNAPLs in Low Permeability Soils, Portsmouth Gaseous Diffusion Plant Piketon." Ohio, 2002.
- White, D. J., and W.A. Take. *GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing*. CUED/D-SOILS/TR322, 2002.
- Yoshida, H., M. Shibasaki, H. Kubo, S. Jimbo, and M. Sakakibara. "The effect of pressure and flow rate on cutting soil utilizing water jet for wider application." *5th American Water Jet Conference*. August 29-31, Toronto, Canada, 1989.

APPENDICE 1

APPENDICE 2

APPENDICE 3

Introduzione

I codici MATLAB *patchshow8* e *qq*, permettono, come detto in 4.7, di visualizzare i risultati ottenuti dall'analisi *geoPIV*, in termini di posizione delle *patches*, il primo ed in termini di vettori spostamento il secondo.

Di seguito per tutte prove vengono riportati le posizioni delle *patches* (nella scala dell'immagine e quindi in *pixel*) per i 5 tempi, pari a 2/500, 5/500, 10/500, 15/500 e 25/500 di secondo e affiancati dai 5 grafici dei vettori spostamento fra 1/500 e 2/500, 5/500, 10/500, 15/500 e 25/500 di secondo rispettivamente (nella scala reale e quindi in *mm*). I grafici dei vettori spostamento sono in scala 5:1. Il software *piv_processXY* come detto in 4.7, ricerca nei file di testo prodotti dall'analisi col codice *geoPIV8* le *n patches* che intersecano un allineamento (detto traguardo) lungo l'asse *y* (il *n°* di *patches* varia tra 15 e 18 a seconda della dimensione della *mesh*), detto traguardo, e ricava gli spostamenti e le loro variazioni per il periodo analizzato, che è sempre pari a 25/500 di secondo, e produce oltre ai dati numerici una serie di grafici che riportano, per le *n patches*:

- gli spostamenti relativi cumulati *x* in funzione del tempo;
- gli spostamenti relativi cumulati *y* in funzione del tempo;
- i delta di spostamento lungo l'asse *x* in funzione del tempo;
- i delta di spostamento lungo l'asse *y* in funzione del tempo;
- gli spostamenti assoluti per 5 tempi diversi:
 1. $t_1=1/500$ di secondo;
 2. $t_2=2/500$ di secondo;
 3. $t_5=4/500$ di secondo;
 4. $t_{10}=10/500$ di secondo;
 5. $t_{15}=15/500$ di secondo;
 6. $t_{25}=25/500$ di secondo.

Le *patches* vengono numerate da 1 a *n* dall'alto verso il basso.

L'analisi viene ripetuta per 11 traguardi, distanti tra loro 100 pixel, distanza che riportata alla scala reale è differente, se pur di poco, per le diverse prove sperimentali, questo a causa del diverso posizionamento del sistema di ripresa nelle diverse prove.

Tali analisi oltre che permettere la base per la misura della velocità di penetrazione, forniscono la base per l'analisi dello stato deformativo indotto dal getto sulla terra.

Di seguito sono riportati i grafici suddetti per gli 11 traguardi, rispettivi alle 13 prove eseguite, di cui 10 con getto fermo e 3 con getto in movimento traslatorio.

Per ogni prova, è infine riportata una prima tabella che riporta i massimi valori delle componenti di spostamento, delle massime variazioni di queste e dei tempi cui queste corrispondono; e una seconda tabella che, invece, riporta il calcolo della velocità di penetrazione, e quindi i valori delle velocità corrispondente al massimo spostamento lungo l'asse *x* per tutte le *patches* sulle sezioni di misura, e per tutte le sezioni stesse.